



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

VLIV INTEGRÁLU TEPLoty A ČASU PÁJENÍ NA KVALITU PÁJENÉHO SPOJE

SOLDER JOINT QUALITY BASED ON HEATING FACTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Kučírek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Martin Kučírek

ID: 146880

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného spoje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte odbornou literaturu z oblasti pájení přetavením. Podrobněji se zaměřte na vliv integrálu teploty a času pájení na mechanické vlastnosti pájeného spoje slitiny SnBi na povrchové úpravě NiAu a imerzní cín.

Upravte desku s plošnými spoji pro rezistory velikosti 0805 nulové hodnoty s testovacími i měřicími body pro měření odporu propojení.

Nastavte a proměřte teplotní profily pro 4 rozdílné integrály teploty a času pájení v mezích tolerance hodnot stanovených výrobcem pájecí pasty. Osadte DPS součástkami do pájecí pasty a zapájejte nastavenými profily. Polovinu zkušebních DPS vystavte i 2. průchodu v přetavovací peci.

Vyhodnoťte vzhled spoje, mikrovýbrus spoje (opticky a pomocí SEM), určete tloušťku IMC vrstvy a proměřte pevnost pájených spojů ve stříhu. Dle časových možností proveďte měření před a po zrychleném stárnutí.

Výsledky graficky zpracujte a soustřeďte se na zjištění závislosti jednotlivých integrálů teploty a času při jedno a dvojnásobném průchodu DPS přetavovací peci. Diskutujte vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu, na elektrické a mechanické vlastnosti pájených spojů při různých hodnotách Q_{η} .

Spolupráce s firmami Honeywell Brno a Gatema Boskovice.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 25.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.]

ABSTRAKT

Diplomová práce v teoretické části rozebírá problematiku integrálu teploty a času ($Q\eta$), jenž má významný podíl na kvalitě pájeného spoje. Praktická část popisuje návrh a postup výroby testovací desky s plošnými spoji pro nastavení teplotních profilů, pájení přetavením SMD rezistorů BiSn pájecí pastou. Dále bylo testováno stříhové namáhání pájených spojů a měřená stříhová síla včetně izotermicky stárnutých vzorků. V závěru práce bylo provedeno hodnocení defektů po pájení, měření tloušťky intermetalické vrstvy pomocí optického mikroskopu i SEM a diskuse dosažených výsledků a zhodnocení $Q\eta$.

KLÍČOVÁ SLOVA

Integrál teploty a času, intermetalická sloučenina, pájení přetavením, životnost pájeného spoje, SMD, BiSn, zkoušky stříhem, SEM

ABSTRACT

Master's thesis in the theoretical part analyses the heating factor ($Q\eta$), which has significant share on quality of a solder joint. The practical part describes the design and production of test PCB and setting temperature profiles, SMD resistors soldering by using BiSn solder paste. Shear tests of SMD solder joints were realised and evaluated including isothermal ageing samples. At the end of master's thesis solder joints visual aspects and defects were evaluated, measurement thickness of intermetallic compound by not only optical microscope but also SEM, discussion about results and $Q\eta$ was evaluated.

KEYWORDS

Heating factor, intermetallic compound, reflow soldering, solder joint lifetime, SMD, BiSn, shear tests, SEM

KUČÍREK, M. *Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2017. 67 s., 8 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného spoje“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Následně děkuji Ing. Zdeňku Jurčíkovi z firmy Honeywell za odborné rady a výpomoc při realizaci praktické části diplomové práce. Na závěr bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Čudkovi za pomoc při vyhodnocení vzorků pomocí elektronové mikroskopie.

V Brně dne

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD.....	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 PÁJENÍ, PÁJECÍ PASTY	9
1.1 SLOŽENÍ PÁJECÍ PASTY	9
1.2 OLOVNATÉ PÁJKY	10
1.3 BEZOLOVNATÉ PÁJKY	10
1.4 BISMUTOVÉ PÁJKY	10
1.5 NANÁŠENÍ PÁJECÍ PASTY	11
2 TEPLOTNÍ PROFILY	12
2.1 PODÉLNÝ TEPLOTNÍ PROFIL	12
2.2 TEPLOTNÍ PROFIL PRO BiSn PÁJKU	13
2.3 PŘÍČNÝ TEPLOTNÍ PROFIL	14
2.4 DEFEKTY PO PÁJENÍ PŘETAVENÍM	14
3 INTERMETALICKÁ SLOUČENINA	15
3.1 VLASTNOSTI IMC	15
3.2 IMC ROZHHRANÍ CU - SN	16
3.3 IMC ROZHHRANÍ NI - SN	17
3.4 IMC ROZHHRANÍ AG - SN	18
3.5 POVRCHOVÉ ÚPRAVY	19
3.5.1 Imerzní cín (ImSn)	19
3.5.2 Imerzní zlato (ENIG)	19
4 INTEGRÁL TEPLOTY A ČASU $Q\eta$.....	20
4.1 VLIV $Q\eta$ NA IMC A SPOLEHLIVOST PÁJENÉHO SPOJE.....	21
II PRAKTICKÁ ČÁST	24
5 TESTOVACÍ DPS.....	24
5.1 VÝROBA DPS PRO OSAZENÍ A TESTOVÁNÍ	25
5.1.1 Výroba DPS pro nastavení teplotního profilu	25

6	TEPLOTNÍ PROFILY	27
6.1	NASTAVENÍ TEPLOTNÍCH PROFILŮ	27
7	TISK PÁJECÍ PASTY, OSAZENÍ A PÁJENÍ	29
7.1	KÓDOVÉ ZNAČENÍ DPS	29
7.2	PÁJECÍ PASTA	29
7.3	TISK PÁJECÍ PASTY	30
7.3.1	Kontrola SPI.....	30
7.4	OSAZENÍ.....	32
7.5	PÁJENÍ.....	32
7.5.1	Vyhodnocení kvality pájení	33
8	IZOTERMICKÉ STÁRNUTÍ.....	36
9	ZKOUŠKY NAMÁHÁNÍ PÁJENÉHO SPOJE STŘIHEM.....	38
9.1	POŠKOZENÍ SPOJE PO NAMÁHÁNÍ STŘIHEM.....	42
10	MIKROVÝBRUSY	45
10.1	VÝROBA MIKROVÝBRUSU	46
10.2	VYHODNOCENÍ MIKROVÝBRUSŮ OPTICKÝM MIKROSKOPEM	47
10.3	VYHODNOCENÍ MIKROVÝBRUSŮ POMOCÍ SEM	51
	ZÁVĚR	57
	LITERATURA.....	59
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ	64
	SEZNAM TABULEK.....	66
	SEZNAM PŘÍLOH	67

ÚVOD

Rostoucí trend montážních propojovacích sestav s vysokou hustotou zástavby s sebou přináší vzrůstající nároky na výrobu desek plošných spojů (DPS), osazení a montáž. Hlavně ale na jakost a spolehlivost pájených spojů, neboť až 50 % poruch DPS je zapříčiněno nespolehlivě a nekvalitně zapájenými spoji.

Diplomová práce se bude zabývat vztahy mezi vlivem změny intermetalické sloučeniny (IMC) v čase v kombinaci s integrálem teploty a času $Q\eta$ a jejich vlivu na kvalitu pájeného spoje.

Teoretická část diplomové práce popisuje vlastnosti pájecích slitin olovnatých, bezolovnatých, i pájecích slitin s bismutem. Dále se věnuje tvorbě a vlastnostem intermetalických sloučenin a jejím vztahu s integrálem teploty a času.

Praktická část popisuje laboratorní výrobu jednostranné DPS z materiálu FR-4 pro nastavení teplotních profilů. Zkušební DPS jsou vyrobeny ve firmě Gatema, polovina s povrchovou úpravou ImSn a druhá polovina s ENIG. Nastavení testovacích RTS teplotních profilů, osazení a pájení přetavením proběhlo ve spolupráci s firmou Honeywell. Pro pájení přetavením byla použita BiSn pájecí pasta. Přetavení v peci proběhlo pro jeden a dva průchody. Vzorky jsou zkoumané v souvislosti s izotermickým stárnutím teplotou 100 °C po dobu 200 h, kdy je měřena změna odporu pájených spojů. Vyhodnocení závislosti IMC na $Q\eta$ dále proběhlo zkouškami stříhovým namáháním s doplňkovým vyhodnocením následných defektů pájeného spoje. Tloušťka IMC vrstvy byla u všech vzorků mikrovýbrusů určena optickým mikroskopem. U části vzorků mikrovýbrusů byla tloušťka IMC vrstvy změřena elektronovým mikroskopem, včetně prvkové mikroanalýzy a vyhodnocení zastoupení jednotlivých prvků.

V závěrečném zhodnocení jsou pak nastíněny výsledky práce, možná zlepšení a návrh oblastí pro bližší zkoumání v dalších bakalářských či diplomových pracích.

I TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část se věnuje problematice teplotních profilů, popisuje integrál teploty a času $Q\eta$ nejen v oblasti přetavení (TAL), ale i v oblasti teplotního vyrovnání. Dále popisuje nejnovější poznatky v oblasti vlivu integrálu teploty na kvalitu pájeného spoje.

1 PÁJENÍ, PÁJECÍ PASTY

Pájení je proces, kdy dojde ke spojení 2 nebo více kovových částí roztaveným kovem (resp. vhodnou slitinou), který má nižší bod tavení, než spojované části. Pájení se dělí podle teploty liquidu na měkké a tvrdé, podle způsobu na ruční a strojní. V mikroelektronice převažuje měkké strojní pájení (do 260 °C). Ruční pájení se používá pouze při opravách, malých sériích nebo při dopajování speciálních komponent (např. konektory, jejichž obal tvoří tepelně málo odolný plast). Vhodné pájení DPS je nezbytné pro dlouhou životnost a jakost celého výrobku.

Měkké pájení je realizováno 3 základními způsoby:

- Pájení přetavením (přetavení nanesené pájecí pasty v pecích nebo parách)
- Pájení vlnou
- Ruční pájení

Pájení je v dnešní době nejrozšířenější spojování součástek. Kvalitně zapájený spoj má velký vliv na spolehlivost a jakost výrobku. Pájky a pájecí pasty lze obecně rozdělit na olovnaté a bezolovnaté. Bezolovnaté pájky se v dnešní době používají (dle nařízení EU o eliminaci zdraví škodlivých materiálů v elektrotechnické výrobě od 1. 7. 2006) pro většinu běžných spotřebních aplikací. [1], [2]

1.1 Složení pájecí pasty

Pájecí pasta se skládá z 3 základních složek, jejich vhodným smícháním získáme pasty s rozdílnou smáčivostí, viskozitou, oxidací aj.:

- Pájecí materiál – kuličky pájecí slitiny v řádech desítek μm (dle třídy zrnitosti)
- Tavidlo – převládá použití „no clean“ tavidel, protože zanechávají minimální množství zbytků a minimalizují se tak náklady na čištění
- Pojivové složky – rozpouštědla, aktivátory, tixotropní přísady, teplotní stabilizátory – upravují viskozitu a vlastnosti během tisku a pájení na požadovanou hodnotu

1.2 Olovnaté pájky

Preferovaná eutektická pájecí slitina Sn63Pb37 s bodem tavení 183 °C (větší procesní okno oproti SAC). Minimalizuje se použití z důvodu toxicity olova. Výjimka platí zejména pro výrobu elektrických zařízení závislých přímo na zdraví člověka (letectví, vojenství, medicína). Výhody olovnatých pájek - lesklejší spoje, které tolik nedegradují v čase, lepší smáčivost, roztékavost, menší povrchové napětí.

1.3 Bezolovnaté pájky

Slitiny SAC (Sn Ag Cu), kde je největším podílem zastoupen Sn. Teplota tavení 217 - 219 °C. Tato vyšší teplota má za následek nižší procesní okno (jen cca 20 °C do maximální přípustné teploty součástek 260 °C po dobu 10 vteřin). Vyznačují se matnějšími a zrnitějšími spoji, uvnitř pájky větší je možnost vzniku dutin (voidů), na povrchu trhliny nebo zvrásnění. Mají horší roztékavost a smáčivost vlivem vyššího povrchového napětí. Ke zlepšení výsledků se často používá dusíková atmosféra.

1.4 Bismutové pájky

Vyšší teploty při reflow procesu, typické pro bezolovnaté pájky, mohou teplotně poškodit pouzdra součástek a negativně ovlivnit kvalitu pájeného spoje. Proto je nízkoteplotní reflow pájení velmi výhodné. Bismutová pájka obsahuje (podle konkrétního složení) okolo 60 % Bismutu a 40 % cínu, někdy se do slitiny přidávají řádově jednotky procent stříbra (Ag zlepšuje smáčení a při vhodné povrchové úpravě snižuje velikost zrn). Uvažujeme – li pájku Bi58Sn42, je teplota tavení pouze 139 °C, což vytváří velké procesní okno. Výhodou je nejen šetrnější proces k teplotnímu namáhání pouzder, ale i ušetřená energie při vyhřevu přetavovací pece. Vrcholová teplota T_p se pohybuje v rozmezí 160 – 180 °C. Tato slitina se blíží nebo i překračuje vlastnosti klasických bezolovnatých pájek.

Velmi dobré smáčení (povrchové napětí pájky, aktivita tavidla a metalizace pájecích plošek), je velmi blízko Sn63Pb37 pájce, neboť většina tavidel je aktivována při teplotách 160 – 170 °C a to je přesně teplota liquidu BiSn (Ag) pájky.

Střihové napětí je způsobeno rozdílným CTE (Coefficient of Thermal Expansion) nesouladem v teplotním namáhání. BiSn pájka prokazuje vyšší pevnost ve střihu než Sn63Pb37 při 20 °C, srovnatelnou při 65 °C a nepatrně nižší ve 110 °C.

Dále bylo prokázáno, že při teplotním namáhání -20 až 110 °C dochází u použití BiSn na SnPb HALu k růstu zrnitosti spoje, zatímco při použití povrchové úpravy OSP (Organic Surface Protection) byl povrch spoje stále hladký. Přidáním malého množství stříbra do

bismutové pájky může poklesnout velikost zrn. Povrchové úpravy ENIG a ImSn mají dobré smáčecí charakteristiky, ale OSP vykazuje nejlepší mechanické a procesní výsledky. SnBi mají nižší povrchové napětí než olovnaté nebo bezolovnaté pájky, což může být problémem pro oboustranný reflow proces (součástky pak nemusí být drženy na místě během druhého reflow. Umístění součástek může být tak více kritické. [6]

1.5 Nanášení pájecí pasty

Nanášení pájecí pasty je uskutečňováno základními metodami:

- Šablonovým tiskem
- Sítotiskem
- Dispenzerem

Přičemž každá metoda může být realizována:

- Ručně
- Poloautomaticky
- Automaticky

2 TEPLOTNÍ PROFILY

Teplotní profil je graf závislosti teploty na čase pájení. Kromě termokamer je to jediný spolehlivý nástroj, který poskytuje informace během pájecího procesu. Teplotní profily jsou členěny na:

- Podélný teplotní profil
- Příčný teplotní profil

Přesné nastavení teplotního profilu je klíčové pro životnost, jakost či komplexně spolehlivost pájeného spoje.

2.1 Podélný teplotní profil

Jsou rozlišovány 2 typy podélného teplotního profilu:

- Sedlový profil - RSS (Ramp Soak Spike)
- Lineární profil - RTS (Ramp To Spike)

RTS profil vykazuje méně problémů s pájitelností, protože tavidlo vydrží déle v oblasti předehřevu. To vede k lepšímu smáčení – zvyšuje účinnost, snižuje defekty po pájení a zjednodušuje pájecí profil. Důležitými parametry RTS profilu jsou:

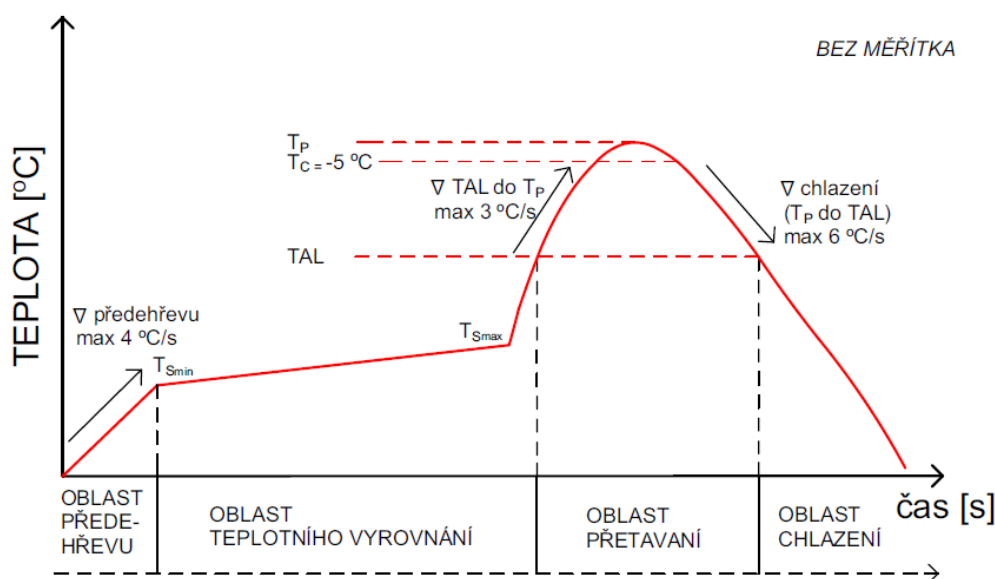
- Oblast předehřevu: gradient (∇) předehřevu nesmí přesáhnout 4 – 5 °C/s kvůli rovnoměrnému ohřevu součástek a DPS, aktivace tavidla, odpažení těkavých složek
- Oblast přetavení: vrcholová teplota T_p nesmí překročit hranici odolnosti plastových součástí – patič, konektorů aj. Čas nad teplotou tavení T_L , též označovaný jako TAL (Time Above Liquidus), by měl být řádově v desítkách sekund
- Oblast chlazení: gradient (∇) chlazení alespoň 5 °C/s, což způsobí minimální nárůst intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 a zabrání tvorbě velkých krystalů uvnitř spoje [3]

U sedlového profilu (obr. 1) je mezi oblastí předehřevu a přetavení ještě oblast teplotního vyrovnání (mezi teplotami T_{smin} a T_{smax}), kdy dochází k dohřevu součástek s větší tepelnou kapacitou a samozřejmě aktivaci tavidla.

Bylo prokázáno, že pro co nejvyšší kvalitu pájeného spoje musí být teplota čipové součástky T_c nižší maximálně o 5 °C. Vrcholová teplota T_p pájecího profilu závisí na tloušťce pouzdra a na jeho objemu, viz tab. 1. [12]

Tab. 1: Závislost T_p na tloušťce a objemu pouzdra čipové součástky [12]

Package Thickness	Volume < 350 mm ³	Volume 350 – 2000 mm ³	Volume >2000 mm ³
< 1.6 mm		260°C	
1.6 mm – 2.5 mm	260°C	250°C	245°C
>2.5mm	250°C	245°C	

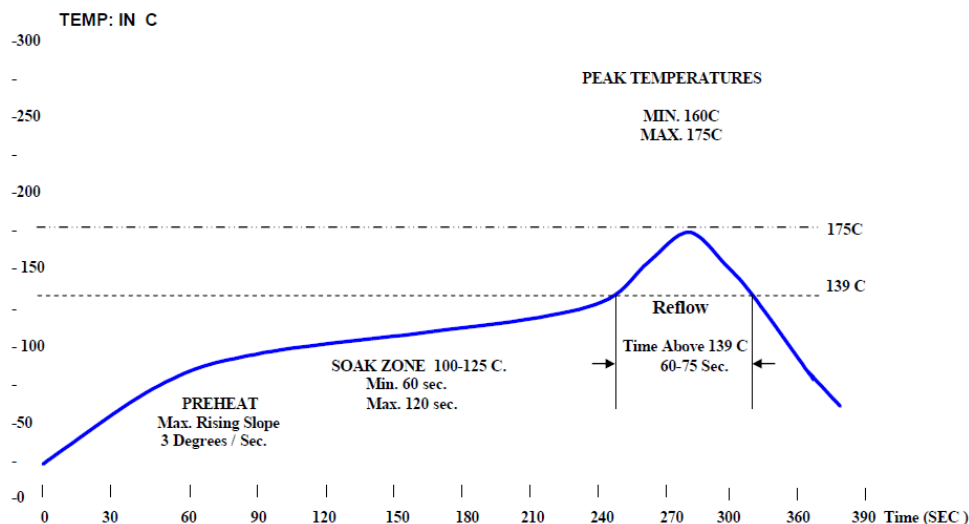


Obr. 1: Obecný teplotní profil RSS pro pájecí slitinu, bez měřítka [12]

Díky informacím umožňujícím porovnání skutečné teploty v reflow peci vs. ideálnímu teplotnímu profilu je možné včas upravit nebo regulovat kolísání teploty v pájecích zónách pecí. Pro měření a nastavení teplotních profilů se používají termočlánky a profiloměry. Ideální teplotní profily poskytují výrobci k danému typu pájecí pasty.

2.2 Teplotní profil pro BiSn pájku

Teplotní profil BiSn pájecí pasty použité v praktické části je na obr. 2. Bylo prokázáno, že pro vhodně nastavený lineární teplotní profil (RTS) je vhodná vrcholová teplota T_p 170 – 180 °C, TAL 70 – 80 s. Nižší procesní teploty často vyžadují delší TAL kvůli tvorbě intermetalické sloučeniny. [6]



Obr. 2: Teplotní profil Bi58Sn42 pájecí pasty Delta 670 firmy Qualitek [10]

2.3 Příčný teplotní profil

Na rozdíl od podélného teplotního profilu je příčný profil ovlivněn hustotou osazení DPS a konstrukcí přetavovací pece. Příčný teplotní profil zobrazuje nehomogenitu přetavovacího tunelu v příčném směru během přetavovacího procesu. Rozdíl teplot, u příčného profilu, dnešních přetavovacích pecí se pohybuje v rozmezí $\pm 2^\circ\text{C}$. [4]

2.4 Defekty po pájení přetavením

Nedodržením vhodného teplotního profilu daného výrobcem nebo špatného výběru pájecí slitiny vůči povrchové úpravě DPS může dojít po pájení k defektům. Nejčastější defekty jsou uvedeny níže a jejich možné příčiny v závorkách:

- Kuličky pájky (nevhodně provedené nanášení pájky, příliš vysoká teplota pájky nebo aktivní tavidlo)
- Můstky (nevhodně nanesená pájecí pasta ve velkém množství, špatný návrh, nevhodné tavidlo)
- Tombstoning (velké rozdíly povrchových energií na pájecích ploškách, teplotní rozdíly na substrátu, nevhodný návrh pájecích plošek)
- Pootočení součástky (rozdílné povrchové napětí, nevhodně nanesená pasta)
- Málo pájky (nevhodně nanesená pájecí pasta, nevhodná pasta)
- Špatná smáčivost (špatná povrchová úprava, nevhodné nebo slabé tavidlo)

3 INTERMETALICKÁ SLOUČENINA

Intermetalická sloučenina (IMC – Intermetallic Compound) je sloučenina minimálně dvou různých kovů, jenž mají odlišné fyzikální a chemické vlastnosti ve srovnání s čistými kovy. Vlivem metalurgické reakce dochází k reakci aktivního prvku (především cínu) s materiálem pájecí plošky, dochází ke smáčení a adhezi a následně k formování IMC na rozhraní obou materiálů. Tloušťka IMC a její morfologie jsou silně ovlivněné nastaveným teplotním profilem. IMC sloučeniny jsou tvořeny kovy s omezenou rozpustností. Intermetalické vrstvy se tvoří mechanismem rozpouštění a po ztuhnutí pájky narůstají mechanismem difuze. Ihned po pájení se tloušťka IMC dle typu pájecí slitiny pohybuje v řádech desetin - jednotek μm , ale vlivem stárnutí mohou vrstvy dosahovat i desítek μm . Difuze se výrazně urychlena zvýšenými teplotami. Rychlost růstu intermetalických vrstev v čase je vyjádřena vztahem:

$$\delta = 10^3 \cdot e^{\frac{-5000}{T}} \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

kde δ je tloušťka IMC v μm , T je teplota v K a t je čas v s [9]

IMC je žádoucí kvůli smáčivosti a metalurgickému propojení, neboť toto je klíčové pro spolehlivý pájený spoj. Ovšem nadměrná tloušťka či nepřítomnost IMC negativně ovlivňuje spolehlivost, protože s rostoucí tloušťkou IMC je spoj křehčí a méně celistvý – tzn. dochází ke zhoršení mechanické pevnosti. S růstem IMC se kromě již zmíněné křehkosti také zvyšuje elektrický odpor, mohou vzniknout trhliny vlivem namáhání.

Je-li vrstva pájky velmi slabá, může nastat, že tuto slabou vrstvu IMC zcela nahradí a poté se vlastnosti spoje mohou podstatně změnit.

Z výše zmíněných faktů plyne, že správně zvolený $Q\eta$ je pro spolehlivý spoj naprosto nezbytný. [7], [8]

3.1 Vlastnosti IMC

Charakteristickými vlastnostmi IMC jsou: horší tepelná a elektrická vodivost, křehkost, smáčivost, vysoká teplota tání, rozdílný teplotní součinitel délkové roztažnosti. V tab. 2 je uveden přehled IMC vrstev u nejpoužívanějších pájek. [7], [8]

Tab. 2: IMC sloučeniny a jejich tloušťky po pájení a zrychleném stárnutí Sn - Ag, Sn - Cu, SAC
1000 h/125 °C a BiSn 1h/600 °C [7]

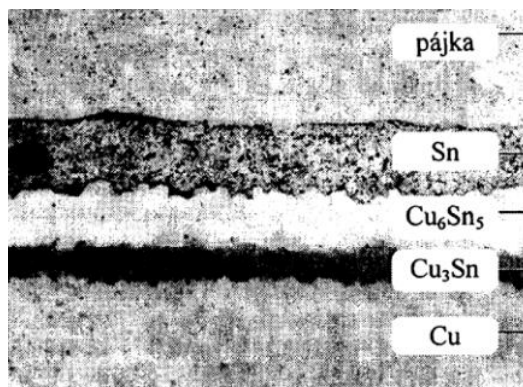
slitina pájky	IMC v pájce	IMC na Cu	tloušťka [μm]		IMC na Ni	tloušťka [μm]	
			po pájení	stárnu		po pájení	stárnu
Sn-Ag	Ag ₃ Sn	Cu ₆ Sn ₅	0,5	2,7	Ni ₃ Sn ₄	< 0,5	2,1
	-	Cu ₃ Sn	-	2,7			
Sn-Cu	Cu ₃ Sn	Cu ₆ Sn ₅	0,8	2,2	(CuNi) ₆ Sn ₅	0,6	1,2
	Cu ₆ Sn ₅	Cu ₃ Sn	-	3,5	Ni ₃ Sn ₄	-	1,9
Sn-Ag-Cu	Ag ₃ Sn	Cu ₆ Sn ₅	0,8	2,2	(CuNi) ₆ Sn ₅	< 0,5	2
	Cu ₃ Sn	Cu ₃ Sn	-	2,2			
Sn-Bi	-	Cu ₆ Sn ₅	0,3	0,6	Ni ₃ Sn ₄	0,1	0,5
		Cu ₃ Sn	0,15	0,9			

3.2 IMC rozhraní Cu - Sn

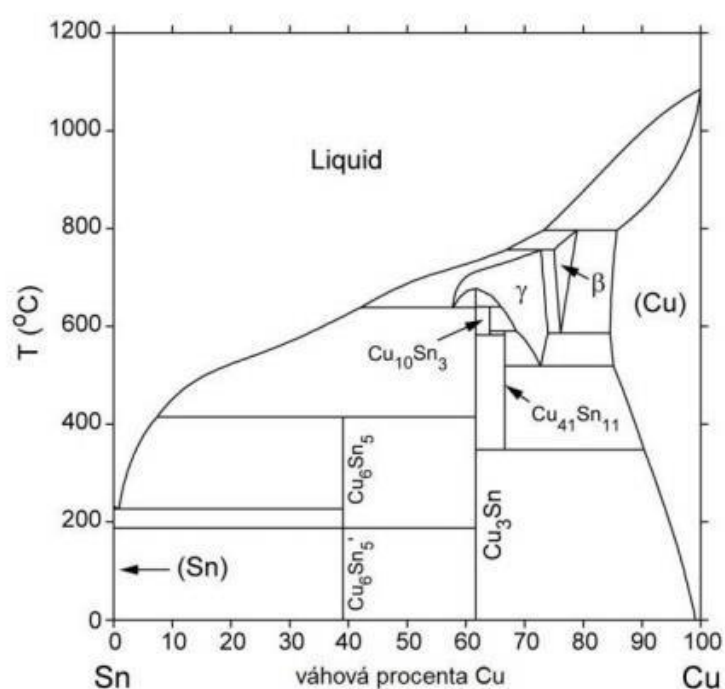
IMC rozhraní Cu – Sn znázorňuje obr. 3, fázový diagram rozhraní měď – cín je vidět na obr. 4:

- „Ihned po smáčení mědi roztavenou pájkou dochází k vytvoření intermetalické sloučeniny Cu₆Sn₅ (η fáze), která se formuje při teplotách nižších než je teplota pájení (příčina - difúze atomů mědi do pájky a atomů cínu do mědi). Bod tání Cu₆Sn₅ je přibližně 415 °C. Vyznačuje se světle šedou barvou, krystalizuje v šesterečné soustavě a tloušťka vrstvy se pohybuje v řádech desetin - jednotek μm . Vznik Cu₆Sn₅ je znakem, že dochází k dobrému smáčení a vytvoření pevné vazby mezi pájkou a substrátem. Růst této sloučeniny ochuzuje pájený spoj o cín.

- Za zvýšených teplot se na rozhraní mědi a Cu₆Sn₅ formuje druhá IMC Cu₃Sn (ε fáze), jenž obsahuje vyšší podíl mědi. Jedná se o nesmáčivou sloučeninu vytvořenou bráněním difúze cínu do mědi a podpořenou difúzí mědi do pájky, krystalizující v kosočtverečné soustavě. Teplota tání je vyšší než 670 °C, má tmavě šedou barvu. Obnovení pájitelnosti substrátu pokrytého vrstvou Cu₃Sn je možné jen po jejím odstranění.“ Stejně IMC jako Cu - Sn tvoří i PÚ ImSn na Cu. [7], [8]



Obr. 3: IMC rozhraní Cu – Sn [2]

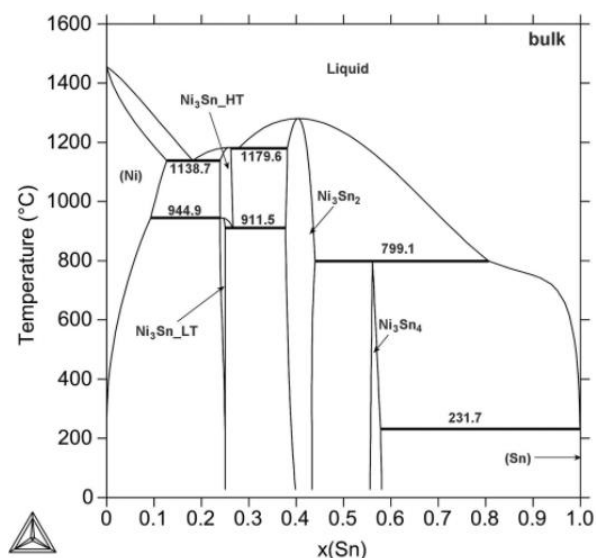


Obr. 4: Fázový diagram rozhraní Sn-Cu [7]

3.3 IMC rozhraní Ni - Sn

Ve výrobním procesu často vyskytující se rozhraní realizované povrchovou úpravou ENIG (chemicky nanesená vrstva Ni, na které je tenká vrstvička Au). Ni - Sn obsahuje tři důležité fáze: $\beta = \text{Ni}_3\text{Sn}$, $\gamma = \text{Ni}_3\text{Sn}_2$, $\delta = \text{Ni}_3\text{Sn}_4$, viz obr. 5. Na rozhraní Ni a Ni_3Sn_4 byla pozorována sloučenina blízká NiSn_3 . Protože se zlato nerozpouští ve stejném rozsahu jako měď, IMC na rozhraní Ni - Sn je formována při nižších teplotách podobnou rychlostí jako vrstvy na rozhraní Cu - Sn, ale při teplotách vyšších je jejich růst IMC výrazně nižší.

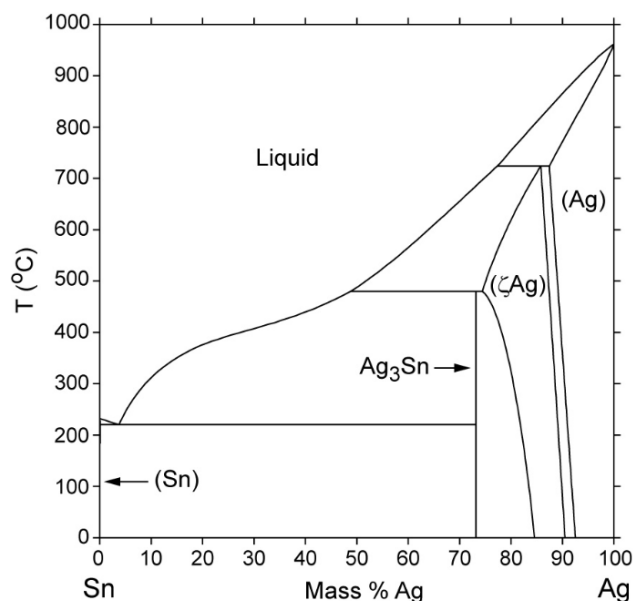
Na rozhraní pájka - nikl vznikají nejčastěji IMC $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$, $(\text{Cu},\text{Ni})_3\text{Sn}_4$ vykazující menší pevnost než Cu_6Sn_5 nebo Cu_3Sn . Dále rostou výrazně rychleji než sloučeniny Ni a proto jsou častou příčinou snížení spolehlivosti pájeného spoje. [16], [8]



Obr. 5: Fázový diagram rozhraní Ni - Sn [17]

3.4 IMC rozhraní Ag - Sn

Eutektické pájecí slitiny obsahující Ag tvoří IMC Ag_3Sn ve formě destiček. Fázový digram na obr. 6. Tato sloučenina může způsobit tvorbu mikrotrhlin při mechanickém či teplotním namáhání. Výskyt Ag_3Sn může být v celém prostoru pájeného spoje. V blízkosti 2 – 3 μm od destiček se vyskytuje oblast výrazně měkkší než v oblastech vzdálených. [8]



Obr. 6: Fázový diagram rozhraní Ag – Sn [18]

Slitina SAC byla testována zkouškou stříhem na kuličce pájky na Cu plošce bez povrchové úpravy. Výsledky ukazují, že:

- Teplota přehřevu mezi 155 a 175 °C neměla žádný významný vliv na stříhovou sílu pájeného spoje SAC-Cu. Přiměřené prodloužení doby přehřevu přispěje ke zlepšení chování spoje ve stříhu.
- Vliv teploty přetavení na stříhovou sílu SAC - Cu pájeného spoje je významnější, čím je delší pájecí čas. Vhodným nastavením parametrů - zvyšující se teplotou přetavení a snižujícím se časem přetavení - se může zlepšit stříhové chování spoje.
- Mírný gradient chlazení (3 K/s) je ke zlepšení chování ve stříhu SAC - Cu spoje výhodnější. [13]

Vzhledem k tomu, že BiSn pájecí slitina má stejné IMC jako SAC, dá se předpokládat, že výsledky této studie budou konvergovat.

3.5 Povrchové úpravy

Povrchová úprava (PÚ) měděného povrchu slouží zejména jako ochrana před jeho oxidací a zajištění dobré pájitelnosti povrchu i při dlouhém skladování. Výběr vhodné povrchové úpravy je volen dle technologických požadavků na následnou montáž. Používají se jak metody pokovování (Sn, Ag, Ni), tak metody pokrytí organickými povlaky (OSP).

Z hlediska ceny, dobré pájitelnosti a dlouhé doby skladovatelnosti je nejpoužívanější povrchovou úpravou bezolovnatý HAL. Při potřebě rovinného povrchu a vícenásobného přetavovacího cyklu je volena PÚ ENIG nebo Imerzní cín.[2]

3.5.1 Imerzní cín (ImSn)

V chemické lázni je selektivně vylučována na povrchu mědi i v prokovených otvorech tenká a rovnoměrná vrstva čistého cínu. Výhodou je již zmíněná rovinnost povrchu, možnost vícenásobného přetavení, dobrá pájitelnost, bezolovnatý proces a nižší cena oproti ENIG. Mezi nevýhody se řadí malá doba skladování. [2], [19]

3.5.2 Imerzní zlato (ENIG)

Chemické pokovení niklem a následné nanesení tenké vrstvičky imerzního zlata. Výhodami jsou již zmíněná rovinnost povrchu, možné vícenásobné přetavení i kontaktování mikrodrátku, dlouhodobé skladování. Nevýhodou je výrazná difuze zlata z povrchu do spoje a v porovnání s ImSn vyšší cena. [2]

4 INTEGRÁL TEPLOTY A ČASU Q_η

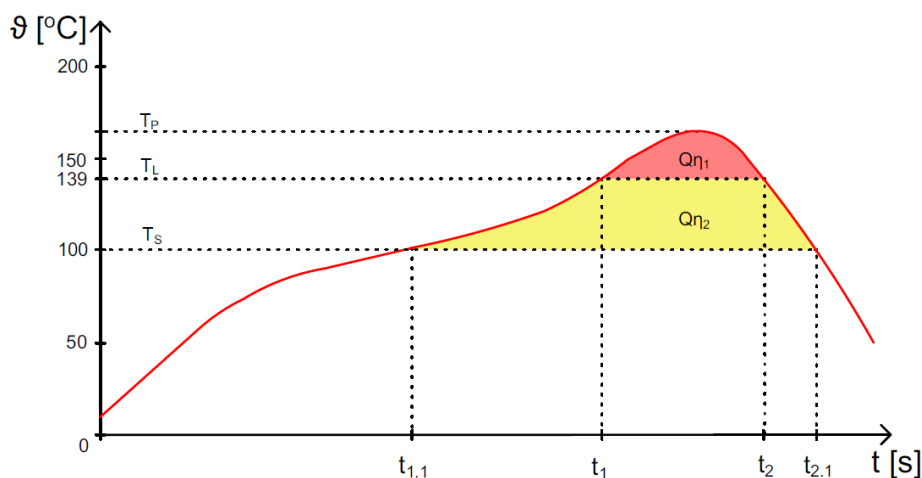
Poruchy pájených spojů mohou mít důsledkem celé řady příčin. Mezi tyto příčiny může patřit například zahřívání spoje vlivem špatného návrhu (lokální zahřívání vlivem nedostatečného chlazení nebo použitého typu součástky), agresivní prostředí, vibrace apod. Ovšem až 50 % poruch DPS je zapříčiněno nespolehlivě a nekvalitně zapájenými spoji s přímou závislostí intermetalických sloučenin. Bylo experimentálně zjištěno, že spolehlivost pájených spojů v čase degraduje s přírůstkem IMC.

Měření IMC poměrně náročné neboť měření je destruktivní. Vyžaduje použití optického, případně elektronového mikroskopu (SEM) nebo energiově disperzní mikroanalýzu (EDS) spolu s mikrovýbrusem pájeného spoje. Je zřejmé, že pro rychlou kontrolu v technologickém procesu výroby je taková kontrola nevhodná. Proto byl v procesu přetavení zaveden nový parametr - Q_η , který dává do souvislosti změnu tloušťky vrstvy IMC v čase spolu s dodaným množstvím tepelné energie při přetavení.

„Heating factor“ z anglické odborné literatury volně přeložen jako: integrál teploty a času. Je značen Q_η . V literatuře je vyjádřen jako integrál teploty $T(t)$ nad teplotou tavení pájky T_L a dobou, kdy je pájka ve stavu liquidu, tedy intervalu t_1 - t_2 . Tato situace je na obr. 7 vyznačena červeně, kdy obrázek popisuje BiSn pájecí pastu. Jeho matematická definice zní: [20]

$$Q_{\eta 1} = \int_{t_1}^{t_2} (T(t) - T_L) dt \quad (2)$$

jednotkou Q_η je $s \cdot K$ (sekunda · kelvin) nebo $s \cdot ^\circ C$ (sekunda · stupeň Celsia)



Obr. 7: Teplotní profil s vyznačením Q_η

Z hlediska tvorby intermetalické sloučeniny může mít vliv i oblast teplotního vyrovnání (na obr. 7 vyznačená žlutě), kdy dochází v této oblasti již k plnému aktivování a reakci tavidel. Při nízkém $Q_{\eta 2}$ nemusí dojít k dostatečné aktivaci aktivátorů a působení tavidel nebo naopak příliš velký $Q_{\eta 2}$ může způsobit, že aktivátory i tavidla plně zreagují a tím může dojít k pájenému spoji s horší spolehlivostí. Matematický zápis tohoto integrálu je pak analogicky s rovnicí 2:

$$Q_{\eta 2} = \int_{t_{1.1}}^{t_{2.1}} (T(t) - T_L) dt \quad (3)$$

Přičemž platí, že v časovém intervalu $t_1 - t_2$: $T = T_L$

Celkový integrál teploty a času ($Q_{\eta C}$), který může být v závislostech na IMC prozkoumán, je dán součtem $Q_{\eta 1}$ a $Q_{\eta 2}$, tedy:

$$Q_{\eta C} = Q_{\eta 1} + Q_{\eta 2} \quad (4)$$

4.1 Vliv Q_{η} na IMC a spolehlivost pájeného spoje

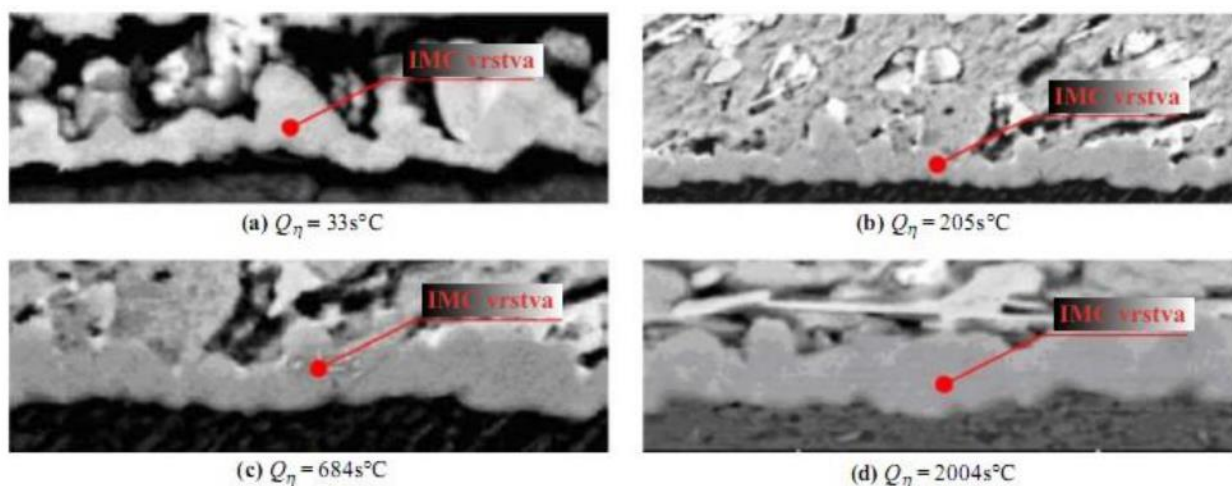
Q_{η} významně ovlivňuje tvorbu intermetalické vrstvy a její morfologii. Bylo dokázáno, že pokud je Q_{η} příliš malá, spolehlivý pájený spoj nemůže vzniknout. Dále bylo zjištěno, že se tloušťka IMC téměř lineárně zvyšuje s přírůstkem Q_{η} až do sazení teploty saturace (např. 3 μm s pájkou Sn63Pb37 na měděné pájecí ploše tloušťky 150 μm). Z výsledku experimentu byla stanovena přibližná rovnice Q_{η} pro uvedenou SnPb pájku:

$$Q_{\eta 1} = 1174 \cdot \delta - 491,3 \quad (5)$$

kde δ je tloušťka IMC vrstvy v μm

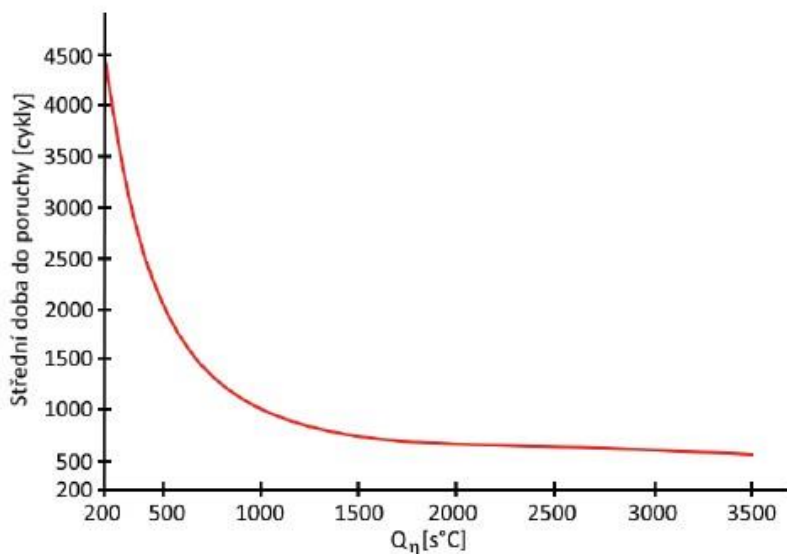
Díky lineárnímu nárůstu se dá tvorba IMC snadno řídit.

Na obr. 8 je na mikrovýbrusu zachycena tloušťka a struktura IMC vrstvy pájeného olovnatého spoje pro 4 hodnoty Q_{η} . Je vidět, že pro nízké hodnoty Q_{η} je IMC vrstva velmi tenká a nesouvislá (spoj bude mít zřejmě krátkou životnost). S růstem Q_{η} je vytvořená vrstva IMC tlustší, hrubší. Nerovný povrch sice zlepšuje mechanickou (např. střihovou) odolnost spoje, ovšem příliš tenká vrstva je křehká a při mechanickém (vibračním) namáhání s vyšší mírou pravděpodobnosti spoj selže. [20]



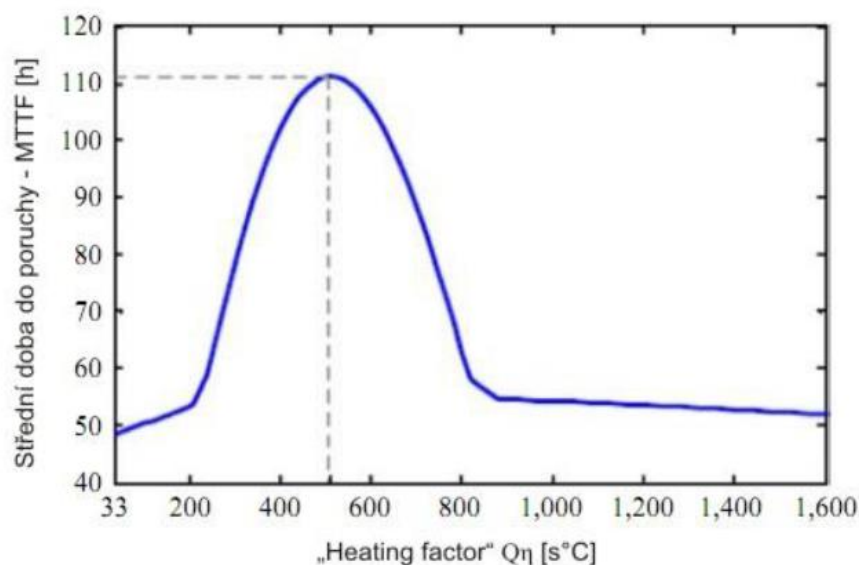
Obr. 8: IMC vrstva pro 4 různé Q_{η} [20]

Pro pájecí slitinu Sn63Pb37 s využitím teplotního cyklování bylo prokázáno (obr. 9), že střední doba do poruchy (MTTF) je závislá jedině na Q_{η} , kdy MTTF monotónně klesá se zvyšujícím se Q_{η} . Z této studie vyplývá, že pokud bude přetavení řízeno s nízkou úrovní Q_{η} , bude dosaženo nejlepších hodnot střední doby do poruchy. [8], [15], [20]



Obr. 9: Závislost střední doby do poruchy na Q_{η} [15]

Druhá spolehlivostní analýza – vibrační test spolehlivosti μBGA pouzder zapájených pájecí pastou Sn63Pb37 při různých hodnotách Q_{η} (obr. 10) ovšem tvrdí, že MTTF nejdříve stoupá k maximu $Q_{\eta} = 500 \text{ s}^{\circ}\text{C}$ a následně se zvyšujícím se Q_{η} klesá, kdy při $Q_{\eta} > 1000 \text{ s}^{\circ}\text{C}$ je pokles MTTF již nevýrazný. Nejlepších hodnot pro dosažení spolehlivě zapájeného spoje u μBGA pouzder se dosahuje při hodnotách $300 - 700 \text{ s}^{\circ}\text{C}$. [8], [14], [15], [20]



Obr. 10: Závislost MTTF na $Q\eta$ pro μ BGA pouzdra [20]

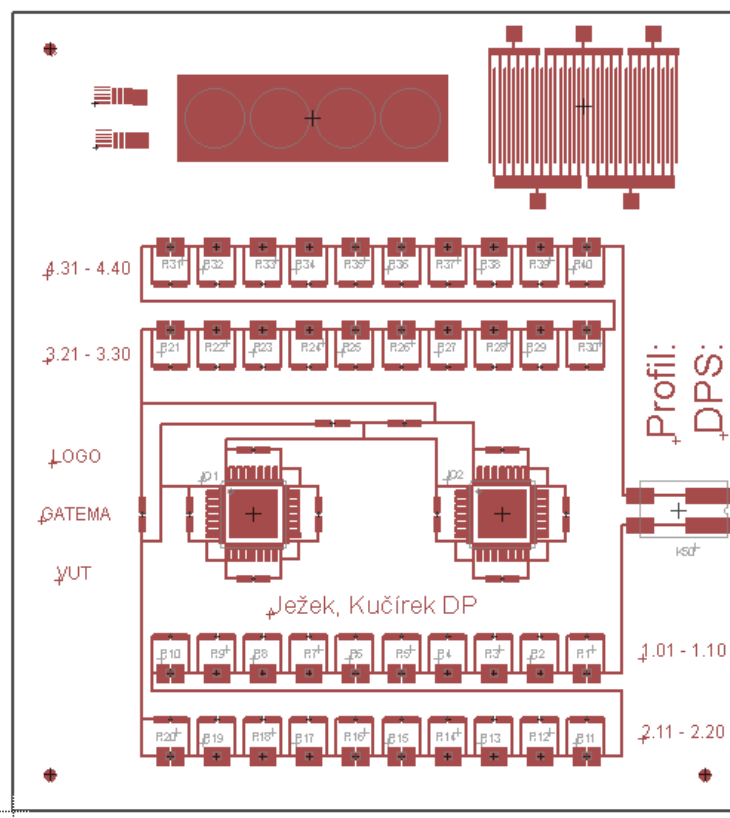
Při optimalizaci teplotního profilu pro použitou pastu je nutné dodržet, aby nejnižší teplota - součástka s velkou tepelnou kapacitou má nejchladnější bod ve středu mezi substrátem a jejím pouzdem - během přetavovacího cyklu neklesla pod teplotu tavení pájecí slitiny a čas nad teplotou tavení (TAL) vyhověl doporučení výrobce pájecí pasty. Náročnost optimalizace teplotního profilu roste s hustotou zástavby součástek na DPS a také při použití součástek s rozdílnými tepelnými kapacitami (například BGA odebere spoustu tepla). [8], [14], [15], [20]

II PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část popisuje technologické zpracování 32 vzorků DPS se dvěma povrchovými úpravami – ImSn a ENIG. Nastavení 4 různých teplotních profilů, osazení nulovými SMD rezistory velikosti 0805 do Bi58Sn42 pájecí pasty a pájení přetavením pro 1 i 2 průchody. Závěrem je vyhodnocen vliv různých integrálů teploty a času na kvalitu pájeného spoje při stárnutí 0, 100 a 200 h zkouškami pevnosti stříhem a ověření závislosti tloušťky IMC vyhodnocením pomocí optického i elektronového mikroskopu.

5 TESTOVACÍ DPS

Pro testovací účely byl modifikován návrh DPS z diplomové práce [8]. Tento návrh byl vytvořen v programu Eagle 6. 4. Na obr. 11 je vidět motiv použité testovací DPS.



Obr. 11: Motiv testovací DPS [8]

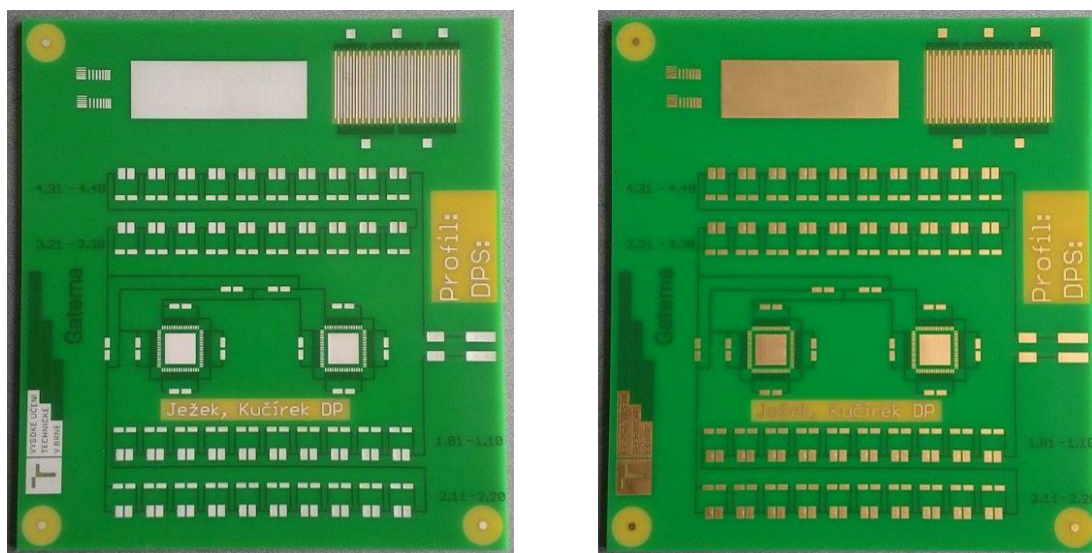
Testovací deska obsahuje 40 kusů nulových SMD rezistorů velikosti 0805, dvě QFN DUMMY pouzdra (uvnitř propojena a vývody zapojeny do série společně s motivem; 64 vývodů – 16 na každé straně) a SMT konektor WAGO. Ke každému SMD rezistoru jsou

navrženy zkratovací plošky - při případné poruše je možné místo překlenout. Zkratovací plošky jsou umístěny i na každé straně QFN pouzdra, kdy je možné QFN pouzdra zkratovat a použít tak pouze SMD rezistory. Deska obsahuje návrh motivu pro měření roztékavosti pájky, SLUMP test a motiv pro měření SIR (povrchový izolační odpor).

Testovací DPS má rozměry 100 x 110 mm, původní rozměry plošek pro SMD rezistory (1,42 x 1,02 mm) byly zvětšeny na 2,3 x 1,5 mm z důvodů zkoušek stříhem (kdy by mohlo při zkoušce dojít k delaminaci plošky). [8] Schéma uvedeno v příloze A.

5.1 Výroba DPS pro osazení a testování

Výroba testovacích DPS proběhla subtraktivní technologií s fotorezistem jako leptuodolnou vrstvou ve firmě Gatema. Rozměry DPS odpovídají návrhu: 100 x 110 mm. Pro výrobu DPS byl použit základní materiál FR-4 (Isola IS400) s oboustranně plátovanou Cu fólií tloušťky 18 μm , přičemž z 1 strany byl vytvořen motiv a z druhé strany byla měděná fólie odleptána. Tloušťka základního materiálu 1,5 mm a T_g 150 °C. [21] Kvůli ochraně motivu je použita (zelená) nepájivá maska. Celkem bylo zhotoveno 36 kusů DPS – 18 ks s povrchovou úpravou ImSn a 18 ks s povrchovou úpravou ENIG. 32 DPS bylo vyrobeno pro testovací účely a 4 ks sloužily pro případnou rezervu. Do levé části DPS byly ještě doplněny loga Gatemy a FEKT VUT. Vyrobené, neosazené DPS jsou na obr. 12.



Obr. 12: Neosazené DPS (ImSn vlevo, ENIG vpravo)

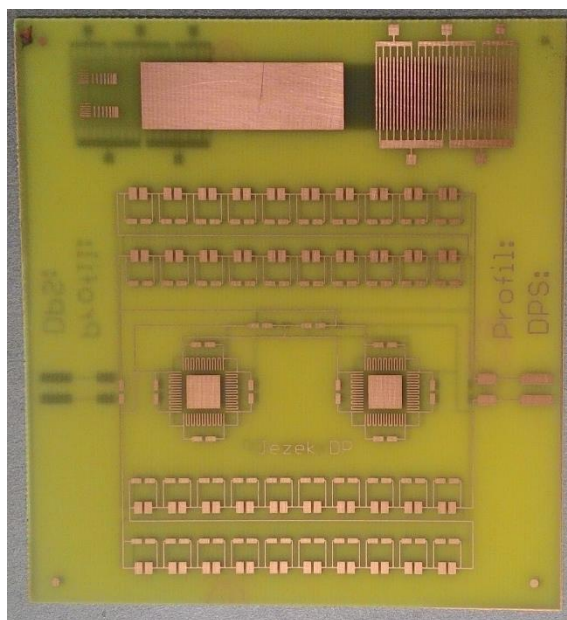
5.1.1 Výroba DPS pro nastavení teplotního profilu

Výroba 1 ks DPS (obr. 13) pro nastavení teplotního profilu byla uskutečněna na VUT Brno, FEKT, ústavu elektrotechnologie. Rozměry DPS odpovídají návrhu: 100 x 110 mm. Jako

materiál byl použit oboustranně plátovaný FR-4 Isola DE104 s T_g 135 °C, tloušťky 1,5 mm. Tloušťka měděné folie je 18 μm . [11]

DPS byla vyrobena subtraktivní technologií s fotorezistem jako leptuodolnou vrstvou, který lze popsat v následujících krocích:

- Naměření rozměrů DPS na oboustranně plátovaném FR-4 základního rozměru
- Dělení FR-4 pákovými nůžkami na jednotlivé desky konečného rozměru 100 x 110 mm
- Kartáčování nastříhaných desek pod vodou (z obou stran), oplach vodou
- Sušení 15 minut při teplotě 70 °C
- Laminace negativního fotorezistu (oboustranně)
- Expozice negativního fotorezistu z obou stran přes negativní motiv
- Vyvolání negativního fotorezistu (1 % roztok Na_2CO_3 , teplota 32 – 35 °C), oplach vodou
- Leptání (roztok HCl , H_2O_2 , H_2O), oplach vodou
- Stripování fotorezistu (10 % roztok KOH v H_2O), oplach vodou
- Sušení 15 minut při teplotě 70 °C



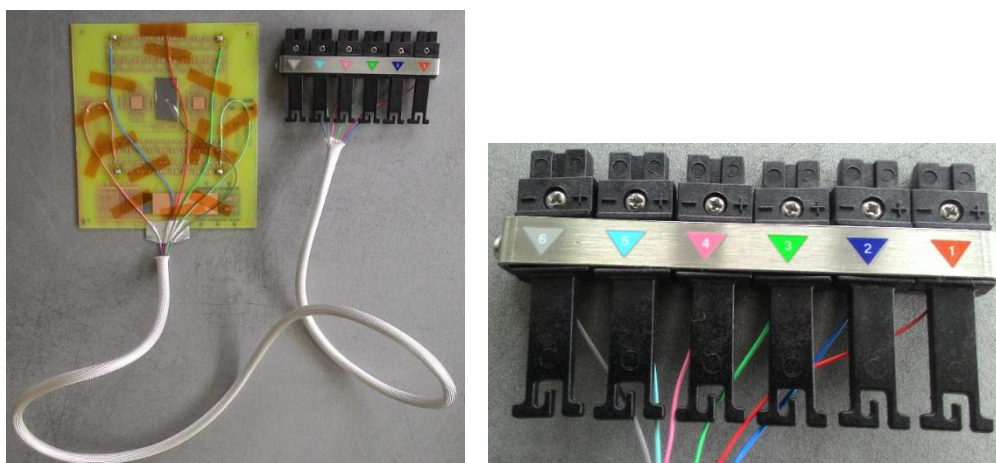
Obr. 13: Vyrobená DPS pro nastavení teplotních profilů

6 TEPLOTNÍ PROFILY

Pro získání závislosti vlivu integrálu teploty a času byly nastaveny 4 teplotní profily (RTS). Kvůli nastavení teplotního profilu bylo nutné prvně připájet termočlánky na již připravenou DPS, viz kapitola 5.1.1.

Na DPS bylo připájeno 6 termočlánků (dále tč) typu K: složení NiCr-Ni, rozsah teplot - 200 až + 1271 °C s rozlišením 0,056 °C; připojených k 6ti kanálovému profiloměru SuperM.O.L.E.® Gold 2. Přesnost profiloměru ± 1 °C. [22] Rozložení termočlánků lze vidět na obr. 14 (tč 1: měření teploty vzduchu, tč 2 – 5: měření v pájeném spoji a tč 6: měří teplotu DPS).

Na připájení termočlánků k desce byla použita pájecí slitina Pb92Sn5,5Ag2,5, která má teplotu tavení 300 °C. Pro lepší fixaci kabelů termočlánků byla dodatečně použita kaptonová a hliníková páska.



Obr. 14: Vlevo: umístění termočlánků na DPS; vpravo: detail značení termočlánků

6.1 Nastavení teplotních profilů

Nastavení 4 teplotních profilů typu RTS proběhlo v brněnské pobočce firmy Honeywell na desetizónové (8 zón pro výhřev a 2 pro chlazení) reflow peci Heller 1808EXL. [23]

Teplotní profily jsou značeny P1 – P4 (P1 je teplotní profil č. 1; P4 je teplotní profil č. 4), tab. 3 popisuje jejich nastavené parametry. Průměrné hodnoty a průměrné směrodatné odchylky jsou vypočítány bez vzduchového termočlánku (tč 1) – hodnota teploty vzduchu v peci byla měřena pouze informativně, tzn. nemá smysl ji průměrovat s hodnotami naměřenými na DPS. Použitá novější verze SW profiloměru (V3.20e) umí vypočítat i hodnotu integrálů $Q_{\eta 1}$, $Q_{\eta 2}$

a $Q_{\eta C}$, takže není nutný další výpočet některou z numerických metod. Grafy teplotních profilů jsou uvedeny v příloze B.

Teplotní profily byly nastaveny pro poměrně velké intervaly: T_p 163 – 186 °C, TAL 30 – 100 s, vzhledem k nízké hustotě zástavby (pouze 40 SMD 0805) byl zvolen kratší čas teplotního vyrovnnání v rozmezí 21 – 45 s. Takto nastavené profily pokrývají poměrně široké procesní okno s přesahem mezních hodnot použité pájecí pasty. Ideálnímu průběhu pro použitou pájecí pastu se blíží teplotní profil P3.

Z hodnot tab. 3 je patrné, že výše popsané nastavení teplotních profilů způsobuje přibližně lineární nárůst $Q_{\eta 1}$, $Q_{\eta 2}$ a $Q_{\eta C}$. Dále s rychlejšími teplotními profily P3 a P4 je změřený rozdíl T_p na jednotlivých termočláncích s vyšší směrodatnou odchylkou než při pomalejších profilech P1 a P2. To je vlivem dostatečného prohrátí DPS, protože při pomalejším profilu přijme DPS vyšší množství tepla. Vzhledem k nízké hustotě montáže SMD rezistorů 0805 vliv tepelné kapacity lze zanedbat. Menších teplotních rozdílů by bylo možné dosáhnout zvýšením doby v oblasti teplotního vyrovnnání (neboli přechodem na teplotní profil RSS), případně zpomalením dopravníku a přenastavením teplot v jednotlivých zónách.

Tab. 3: Důležité parametry P1 – P4 včetně Q_{η}

		∇ předehřevu 0 - 100 °C	Soak 100 - 125 °C	T_p	TAL	∇ chlazení T_p - 139 °C	$Q_{\eta 1}$	$Q_{\eta 2}$	$Q_{\eta C}$	v
		[°C/s]	[s]	[°C]	[s]	[°C/s]	[s·°C]			[cm/min]
P1	\varnothing_{2-6}	1,892	25,20	163,4	31,20	-1,168	350,8	2332	2683	140
	σ_{2-6}	0,064	0,400	0,731	0,980	0,076	8,035	92,64		
P2	\varnothing_{2-6}	1,726	21,80	171,3	51,20	-1,026	809,2	2955	3764	110
	σ_{2-6}	0,078	0,400	1,216	2,482	0,120	28,99	138,8		
P3	\varnothing_{2-6}	1,384	44,80	178,5	75,00	-1,188	1460	4541	6002	65
	σ_{2-6}	0,052	0,748	0,398	2,098	0,056	8,518	136,5		
P4	\varnothing_{2-6}	1,382	35,20	186,4	92,20	-1,304	1907	5456	7363	60
	σ_{2-6}	0,093	0,400	0,369	2,040	0,114	41,97	175,7		

7 TISK PÁJECÍ PASTY, OSAZENÍ A PÁJENÍ

Technologické operace tisku pájecí pasty, následné SPI; dále osazení a pájení DPS proběhlo rovněž v brněnské pobočce firmy Honeywell. Bylo osazeno 34 DPS (17 ImSn a 17 ENIG) SMD rezistory 0805 do pájecí pasty Delta 670 fy. Qualitek a zapájeno teplotními profily P1 – P4.

7.1 Kódové značení DPS

Aby byla orientace a budoucí práce s vyhodnocováním DPS rychlá a snadná, bylo zvoleno jednoduché značení. Přehled možných kombinací ukazuje tab. 4. Písmeno značí povrchovou úpravu (S – Sn; A – Ag). První číslice udává číslo teplotního profilu (P1 – P4), druhá číslice značí počet reflow cyklů (1 nebo 2 cykly) a třetí číslice znamená číslo desky (1. nebo 2.). Například S 3.2.1 znamená povrchová úprava imerzním cínem, teplotní profil 3, 2x reflow a 1. deska; nebo A 2.1.2 znamená povrchová úprava imerzním zlatem při druhém teplotním profilu, 1x reflow cyklus a 2. deska. Značení bylo provedeno před tiskem pájecí pasty.

Tab. 4: Přehled kódového značení DPS

		reflow 1x		reflow 2x	
		DPS č. 1	DPS č. 2	DPS č. 1	DPS č. 2
ImSn	P1	S 1. 1. 1	S 1. 1. 2	S 1. 2. 1	S 1. 2. 2
	P2	S 2. 1. 1	S 2. 1. 2	S 2. 2. 1	S 2. 2. 2
	P3	S 3. 1. 1	S 3. 1. 2	S 3. 2. 1	S 3. 2. 2
	P4	S 4. 1. 1	S 4. 1. 2	S 4. 2. 1	S 4. 2. 2
ENIG	P1	A 1. 1. 1	A 1. 1. 2	A 1. 2. 1	A 1. 2. 2
	P2	A 2. 1. 1	A 2. 1. 2	A 2. 2. 1	A 2. 2. 2
	P3	A 3. 1. 1	A 3. 1. 2	A 3. 2. 1	A 3. 2. 2
	P4	A 4. 1. 1	A 4. 1. 2	A 4. 2. 1	A 4. 2. 2

7.2 Pájecí pasta

Byla použita bezoplachová Bi58Sn42 pájecí pasta Delta 670 fy. Qualitek (obr. 15). Výhodou no-clean pájecích past je, že zanechávají malé množství tavidlových zbytků a proto není nutné jejich následné čištění. Další obecné výhody BiSn pájecích slitin jsou popsány v teoretické části diplomové práce - kapitola 1. 4. Teplota tavení pasty Delta 670 je 139 °C, třída zrnitosti 3 (20 - 45 µm), obsah kovových částic 88 %, tavidlo ROL0, viskozita 175 – 205 Pa·s, datum expirace 16. září 2017. [10] Její teplotní profil ukazuje obrázek 2. Kompletní technický list uveden v příloze C.



Obr. 15: Parametry pájecí pasty Delta 670

7.3 Tisk pájecí pasty

Tisk pájecí pasty byl proveden zařízením MPM Momentum, obr. 16. [24] Šablona byla použita z diplomové práce [8]. Materiál nerezová ocel tloušťky 130 μm , apertury zhotovené laserem. Tisk pájecí pasty proběhl nejdříve na 4 DPS s ImSn pro první teplotní profil P1 a poté 4 DPS s ENIG pro profil P1. Následovaly 4 DPS s ImSn pro P2 a 4 DPS s ENIG pro P2. Obdobně pro P3 a P4.



Obr. 16: Vlevo – MPM Momentum - zařízení pro tisk pájecí pasty; vpravo detail šablony po tisku

Technologické parametry tisku (rychlost tisku, přítlak těrky, rychlost odtrhu) jsou na přání Honeywellu utajeny.

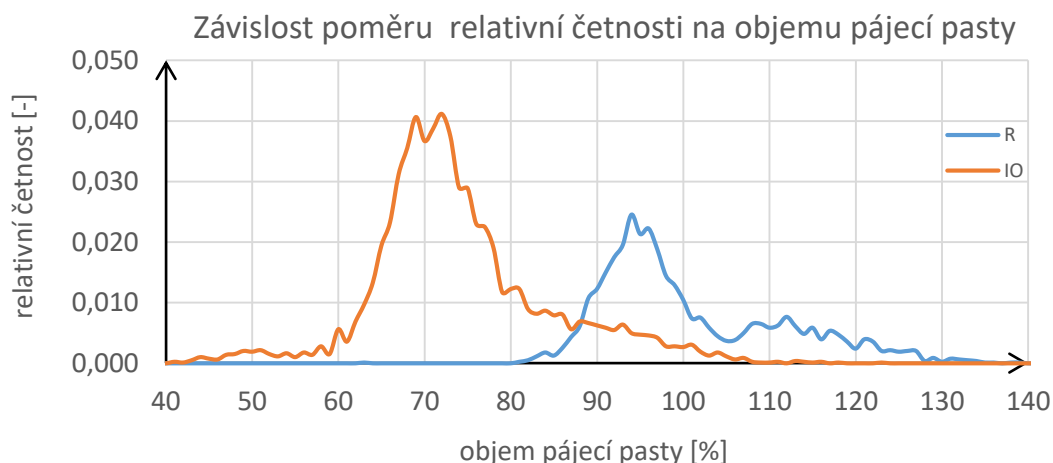
7.3.1 Kontrola SPI

Kontrola tisku pájecí pasty byla provedena pomocí zařízení Koh Young KY 8030-3, obr. 18. [25] Na 34 ks DPS bylo celkem zkontrolováno 7820 bodů (230 bodů na 1 DPS). Tab. 5 shrnuje výsledky SPI. Je vidět značná směrodatná odchylka mezi průměrným relativním objemem (poměr reálně natisknutého objemu k teoretickému objemu vyjádřený v %) a jeho minimální a maximální hodnotou. Ta je dána různými velikostmi apertur v šabloně pro pouzdra SMD odporů a QFN.

Tab. 5: Výsledky SPI

Ø relativní objem	minimum	maximum	σ
[%]			
82,97	40,3	138,6	16,38

Pro bližší rozdělení objemu pájecí pasty byl z naměřených dat SPI sestaven graf závislosti poměru relativní četnosti na objemu pájecí pasty (obr. 17). Relativní poměr četností je vypočítán z absolutního poměru četností k celkovému počtu měřených bodů. Graf ukazuje, že natisknutá pasta dosahuje lepších výsledků u pájecích plošek odporů oproti pájecím ploškám pro QFN. To je dáno rozdílnou velikostí apertur (poměr plochy stěn apertury k natisknuté ploše) a nedochází k tak výrazné adhezi pájecí pasty ke stěnám apertury jako u menších apertur QFN pouzder.



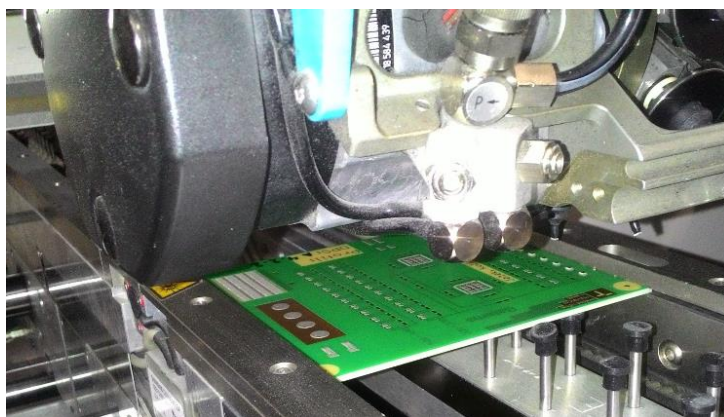
Obr. 17: Graf závislosti poměru relativní četnosti na objemu natisknuté pájecí pasty



Obr. 18: Zařízení pro SPI – Koh Young KY 8030-3

7.4 Osazení

Osazení SMD rezistorů 0805 proběhlo na osazovacím automatu Siemens Siplace X4 (obr. 19). Siplace X4 má 12cti tryskovou osazovací hlavu. Za hodinu teoreticky zvládne osadit 124 000 součástek do velikosti až 01005. [26] Nulové SMD 0805 rezistory byly použity od výrobce YAGEO, typ RC0805JR-070RL, tolerance 5%, terminály nikl/cín, rozměry 2 x 1,25 x 0,5 ($\pm 0,1$) mm, plocha obou terminálů (2x spodní + 2x čelní strana) 2,12 mm². [5]



Obr. 19: Vlevo – osazovací automat Siemens Siplace X4; vpravo – detail osazovací hlavy s částečně osazenou DPS

7.5 Pájení

Pájení přetavením bylo provedeno bez přídavné atmosféry na desetizónové (8 výhřev, 2 chlazení) peci Heller 1808EXL, obr. 20. Jedná se o pec s nucenou konvekcí vybavenou kombinovaným dopravníkem. Na peci lze nastavit teplotu 8 výhřevových zón a rychlost dopravníku.



Obr. 20: Desetizónová pec Heller 1808EXL

Na peci byl prvně nastaven teplotní profil P1 (příloha B1). Po zahřání jednotlivých zón na požadovanou teplotu bylo posláno 8 testovacích DPS, přičemž první 4 byly vždy s PÚ ImSn postupně dle kódového značení z tab. 6. Následně 4 s PÚ ENIG a dodržením kódového značení. V prvním přetavovacím cyklu byla polovina, tj. 4 značené DPS, vystavena druhému průchodu. Opět bylo zachováno pořadí – prvně DPS s ImSn a následně ENIG. Po dokončení obou přetavovacích cyklů byl nastaven teplotní profil P2 (P3, na závěr P4) a pořadí posílání DPS po dopravníku se opakovalo. U P4 byly pro 1 přetavovací cyklus zapájeny i 2 rezervní DPS (jedna ImSn/ENIG).

Tab. 6: Pořadí testovacích DPS při průchodu přetavovací peci

	pořadí DPS pro 1 přetavovací cyklus	pořadí DPS pro 2 přetavovací cykly
P1	S 1. 1. 1, S 1. 1. 2, S 1. 2. 1, S 1. 2. 2; A 1. 1. 1, A 1. 1. 2, A 1. 2. 1, A 1. 2. 2	S 1. 2. 1, S 1. 2. 2; A 1. 2. 1, A 1. 2. 2
P2	S 2. 2. 1, S 2. 1. 2, S 2. 2. 1, S 2. 2. 2; A 2. 1. 1, A 2. 1. 2, A 2. 2. 1, A 2. 2. 2	S 2. 2. 1, S 2. 2. 2; A 2. 2. 1, A 2. 2. 2
P3	S 3. 1. 1, S 3. 1. 2, S 3. 2. 1, S 3. 2. 2; A 3. 1. 1, A 3. 1. 2, A 3. 2. 1, A 3. 2. 2	S 3. 2. 1, S 3. 2. 2; A 3. 2. 1, A 3. 2. 2
P4	S 4. 1. 1, S 4. 1. 2, S 4. 2. 1, S 4. 2. 2; A 4. 1. 1, A 4. 1. 2, A 4. 2. 1, A 4. 2. 2	S 4. 2. 1, S 4. 2. 2; A 4. 2. 1, A 4. 2. 2

7.5.1 Vyhodnocení kvality pájení

Vyhodnocení kvality pájení bylo provedeno pomocí optického mikroskopu OLYMPUS SZ61 s digitální kamerou UI-1440-C v souladu s normou IPC-A-610 revize F.

PÚ ImSn:

- **P1, $Q_{\eta 1}$: 350 s $^{\circ}$ C:** Spoje vykazují pro 1 reflow cyklu velké množství kuliček pájky způsobující porušení minimální elektrické izolační vzdálenosti, které mohou způsobit zkrat (obr. 21a). Velké množství tavidlových zbytků (obr. 21d). Dále nedostatečné přetavení a horší smáčení – lze pozorovat částečně přetavené kuličky pájky a v důsledku zvrásněný nehomogenní povrch. Zašedlý povrch. Tyto příčiny zjevně značí nedostatečnou teplotu předehřevu a TAL při přetavení. Test přetavení pájecí pasty na natisknuté ploše 60 %, druhý průchod vykazuje menší zlepšení (70 %). Horší smáčení plošek pro QFN (23b).
- **P2, $Q_{\eta 1}$: 809 s $^{\circ}$ C:** Zmenšuje se počet výskytu kuliček pájky. Dobrá smáčivost. Spoje vizuálně lesklejší než u P1, zmenšuje se zvrásnění povrchu. Nerovnoměrný výskyt tavidlových zbytků. U druhého průchodu dochází ke slabému smáčení, až

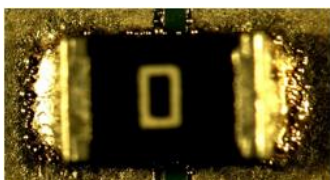
odsmáčení pájecích plošek pro SMT konektor WAGO (obr. 24a, b).

- **P3, $Q_{\eta 1}$: 1460 s $^{\circ}$ C a P4, $Q_{\eta 1}$: 1907 s $^{\circ}$ C:** Již minimální výskyt kuliček pájky. Ideální přetavení 100 % (obr. 22c). Povrch spoje je hladký a lesklý (obr. 21e). Nerovnoměrný výskyt tavidlových zbytků (obr. 23c).

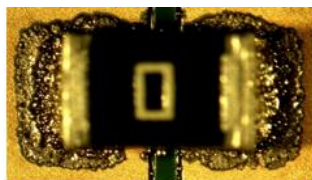
PÚ ENIG:

- **P1, $Q_{\eta 1}$: 350 s $^{\circ}$ C:** Spoje vykazují pro 1 reflow cyklus rovněž velké množství kuliček pájky, ovšem oproti ImSn nezpůsobují porušení minimální elektrické izolační vzdálenosti (obr. 21b). Výrazně zašedlý povrch (obr. 23a). Pájecí pasta přetavena podle testu na ploše pouze 10 % (obr. 22a), horší smáčení – lze pozorovat opět částečně přetavené kuličky pájky a v důsledku zvrásněný povrch. Pozorováno nerovnoměrné množství tavidlových zbytků. Tyto závady jsou způsobeny nedostatečnými integrály $Q_{\eta 1}$ a $Q_{\eta 2}$, jako u ImSn. U druhého průchodu vlivem dodaného tepla menší zlepšení.
- **P2, $Q_{\eta 1}$: 809 s $^{\circ}$ C:** Minimální výskyt kuliček pájky (obr. 21c). Zlepšuje se smáčivost povrchu – test přetavení pasty na natisknuté ploše 50 % (obr. 22b). Spoje lesklejší oproti P1, zmenšuje se zvrásnění povrchu a rozeznávání kuliček pájky. Nerovnoměrný výskyt tavidlových zbytků. Opět dodaným teplem u druhého průchodu lze pozorovat zlepšení.
- **P3, $Q_{\eta 1}$: 1460 s $^{\circ}$ C a P4, $Q_{\eta 1}$: 1907 s $^{\circ}$ C:** Již nevykazují výskyt kuliček pájky. Test přetavení pasty na natisknuté ploše 100 % značí ideální smáčení, povrch spoje je hladký a lesklý (obr. 21f). Nerovnoměrný výskyt tavidlových zbytků (obr. 23c, 24c).

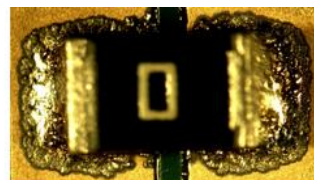
Obecně pro obě PÚ platí, že u P1 jsou pro spolehlivé přetavení nedostatečné hodnoty $Q_{\eta 1}$ a $Q_{\eta 2}$. S dodaným vyšším množstvím tepla u profilu P2 dochází ke zlepšení. V souladu s normou IPC-A-610 revize F platí: PÚ ImSn: P1 závadné spoje, P2, P3 a P4: přijatelné spoje; PÚ ENIG: P1, P2: závadné spoje, P3, P4: přijatelné spoje. Teplotní profily P3 ($Q_{\eta 1}$: 1460 s $^{\circ}$ C) a P4 ($Q_{\eta 1}$: 1907 s $^{\circ}$ C) již vykazují hladké a lesklé spoje (jako SnPb slitiny) s ideálním smáčením a minimálním výskytem kuliček pájky neovlivňujícím minimální elektrickou izolační vzdálenost. Ani v jednom případě nebyl odhalen další defekt jako zkrat, krápník, pavučina, můstek nebo tombstoning. U všech 4 teplotních profilů a obou povrchových úprav se vyskytuje nerovnoměrně rozložené množství tavidlových zbytků, což značí pravděpodobně nízký $Q_{\eta 2}$ (nedostatečný čas na zreagování tavidla).



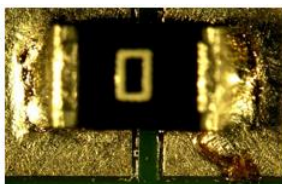
a) S 1. 1. 1_kuličky pájky



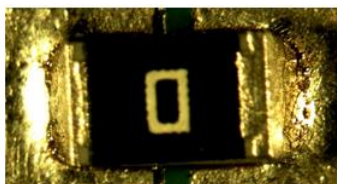
b) A 1. 1. 1_kuličky pájky



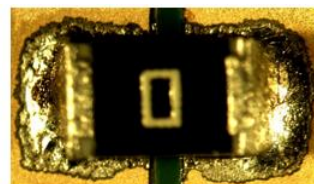
c) A 2. 1. 1_kuličky pájky



d) S 4. 1. 1_tav. zbytky



e) S 4. 2. 1_dobré smáčení

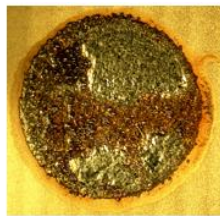


f) A 3. 2. 1_dobré smáčení

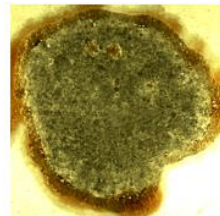
Obr. 21: Vyhodnocení kvality pájení: SMD detail – kuličky pájky, tavidlové zbytky, smáčení



a) A 1. 1. 1 – 10 %

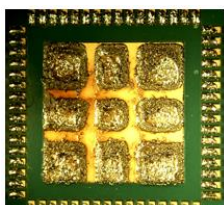


b) A 2. 1. 1 – 50 %

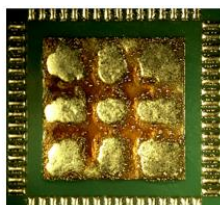


c) S 3. 1. 1 – 100%

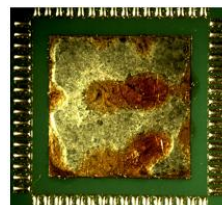
Obr. 22: Vyhodnocení testu přetavení pájecí pasty na natisknuté ploše



a) A 1. 1. 1_nepřetavení

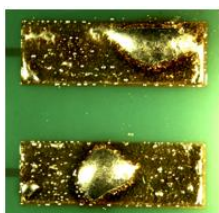


b) S 1. 1. 1_nepřetavení

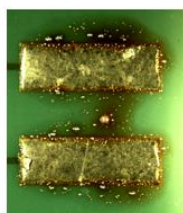


c) S 4. 1. 2_tav. zbytky

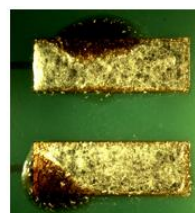
Obr. 23: Vyhodnocení pájecích plošek QFN



a) S 2. 2. 2_odsmáčení



b) S 2. 2. 1_kuličky pájky



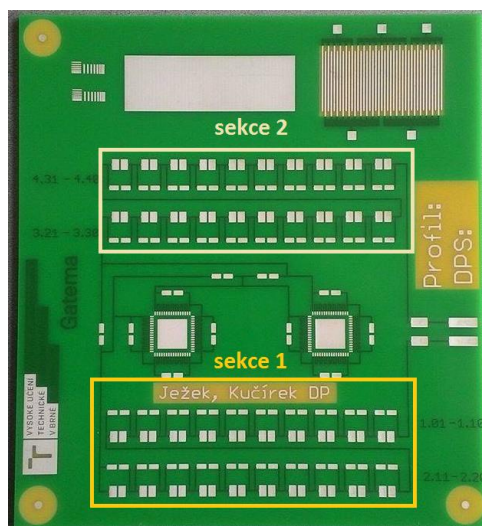
c) A 4. 1. 1_tav. zbytky

Obr. 24: Pájecí plošky pro SMD WAGO

8 IZOTERMICKÉ STÁRNUTÍ

Všech 32 DPS bylo vystaveno izotermickému stárnutí v horkovzdušném sterilizátoru Chirana HS 61 A při teplotě 100 °C po dobu 100 a 200 h podle normy JESD22-A104C. Odpor propojení byl měřen na rezistorové sekci 1: rezistory č. 1.01 – 2.20 a sekci 2: rezistory č. 3.21 – 4.40, viz obr. 25.

Po uběhnutí stárnuté doby byly vzorky vytaženy z Chirany HS 61 A a po dobu jedné hodiny proběhlo teplotní vyrovnaní. Měření prováděno pomocí čtyřbodové metody na multimetru Metra M1T 291 a konstantních podmínkách při teplotě $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro nestárnuté vzorky proběhlo měření na obou sekcích, zde sekce 1 vykazovala oproti sekci 2 o $0,1\text{ }\Omega$ vyšší odpor (příloha D). Protože sekce 1 dále sloužila pro měření stříhové síly a vzorky mikrovýbrusů, nebylo možné změny odporu dále sledovat a vyvodit další srovnání obou sekcí. Měření stárnutých vzorků při 100 a 200 h bylo měřeno v sekci 2. Výsledná hodnota odporu se získala průměrem obou vzorků DPS, např. S 1. 1. 1 a S 1. 1. 2.



Obr. 25: Členění sekcí pro měření odporu

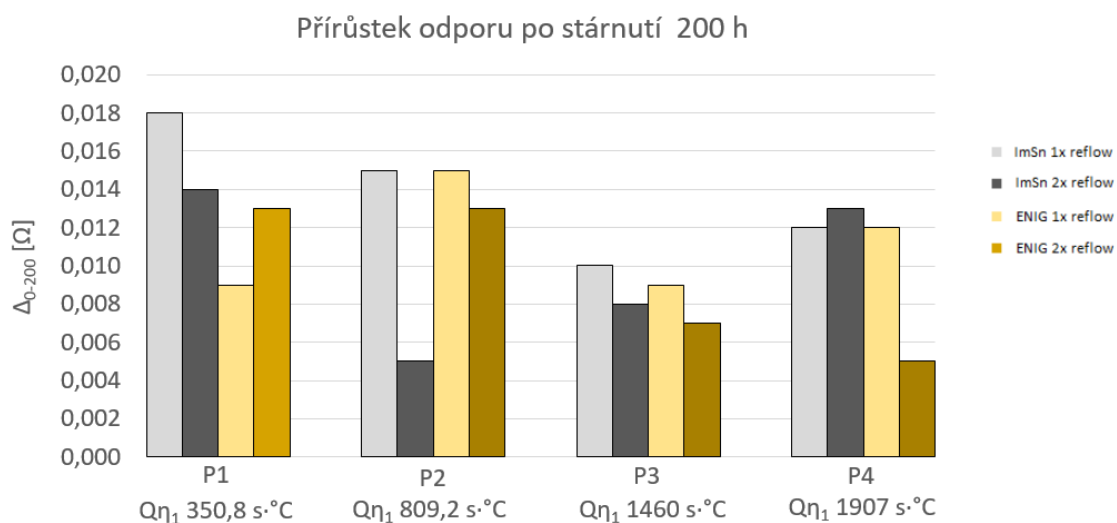
Tab. 7 popisuje průměrné hodnoty při stárnutí 0, 100 i 200 hodin. Nejnižší hodnotu odporu vykazuje měření nestárnutých vzorků. Po stárnutí 100 h hodnota odporu lineárně vzrostla o 0,001 – 0,012 Ω (0,1 – 0,8 %). Mezi stárnutím 100 a 200 h dochází opět k lineárnímu přírůstku odporu v rozmezí 0,003 až 0,012 Ω .

Při srovnání rozdílu odporu před stárnutí a po stárnutí (obr. 26) dochází k lineárnímu přírůstku odporu propojení o $0,005 - 0,018 \, \Omega$ (0,4 – 1,2 %). Dále platí, že změna odporu je u obou PÚ pro druhý průchod menší než pro první průchod. Příčinou je růst intermetalický

vrstvy formou difuze, kdy dochází ke zpomalení růstu odporu (při vyšších hodnotách $Q\eta$ se se tvoří tlustší IMC a zpomaluje další růst IMC a tím i růst odporu). Výše popsané skutečnosti neplatí pro P4, tedy největší integrál $Q\eta_1$.

Tab. 7: Srovnání stárnutí 0, 100 a 200 h

		r e f l o w	stárnutí											
			0h		100 h				200h					
			\emptyset	σ	\emptyset	σ	Δ_{0-100}	Δ_{0-100}	\emptyset	σ	$\Delta_{100-200}$	$\Delta_{100-200}$	Δ_{0-200}	Δ_{0-200}
			[Ω]		[Ω]				[Ω]		[%]		[Ω]	[%]
P 1	ImSn	1	1,448	0,006	1,460	0,004	0,012	0,829	1,466	0,004	0,006	0,411	0,018	1,243
		2	1,463	0,003	1,469	0,003	0,006	0,410	1,477	0,003	0,008	0,545	0,014	0,957
	ENIG	1	1,444	0,002	1,445	0,004	0,001	0,069	1,453	0,005	0,008	0,554	0,009	0,623
		2	1,446	0,004	1,447	0,008	0,001	0,069	1,459	0,009	0,012	0,829	0,013	0,899
P 2	ImSn	1	1,431	0,013	1,437	0,011	0,006	0,419	1,446	0,012	0,009	0,626	0,015	1,048
		2	1,461	0,004	1,463	0,003	0,002	0,137	1,466	0,004	0,003	0,205	0,005	0,342
	ENIG	1	1,450	0,011	1,453	0,008	0,003	0,207	1,465	0,011	0,012	0,826	0,015	1,034
		2	1,436	0,004	1,442	0,008	0,006	0,418	1,449	0,007	0,007	0,485	0,013	0,905
P 3	ImSn	1	1,440	0,013	1,444	0,012	0,004	0,278	1,450	0,012	0,006	0,416	0,010	0,694
		2	1,462	0,004	1,464	0,004	0,002	0,137	1,470	0,006	0,006	0,410	0,008	0,547
	ENIG	1	1,451	0,005	1,454	0,004	0,003	0,207	1,460	0,003	0,006	0,413	0,009	0,620
		2	1,451	0,013	1,453	0,013	0,002	0,138	1,458	0,014	0,005	0,344	0,007	0,482
P 4	ImSn	1	1,452	0,006	1,459	0,008	0,007	0,482	1,464	0,006	0,005	0,343	0,012	0,826
		2	1,460	0,008	1,468	0,004	0,008	0,548	1,473	0,003	0,005	0,341	0,013	0,890
	ENIG	1	1,448	0,002	1,452	0,004	0,004	0,276	1,460	0,004	0,008	0,551	0,012	0,829
		2	1,462	0,008	1,464	0,006	0,002	0,137	1,467	0,007	0,003	0,205	0,005	0,342



Obr. 26: Graf přírůstku odporu po stárnutí 200 h

9 ZKOUŠKY NAMÁHÁNÍ PÁJENÉHO SPOJE STŘIHEM

Zkoušky namáhání pájeného spoje střihem byly provedeny na testeru Dage PC 2400. Princip destruktivní metody lze vidět na obr. 27. DPS je usazena do držáku, aby se deska zafixovala. Testovací trn se vycentruje do blízkosti SMD rezistoru. Před testováním je vytvořeno pod držákem vakuum. Po spuštění měření se testovací trn dotkne desky, vyjede do nastavené výšky a poté se pohybuje nastavenou rychlostí k SMD rezistoru. Následně trn do rezistoru tlačí, dokud nedojde k jeho odtržení. Do programu se zaznamenává maximální síla střihu, lze značit i číslo poruchy (po číselným kódem je třeba si předem definovat poruchy, které budou zkoumány). Na utržený spoj je možné se podívat a vyhodnotit typ (číslo) defektu pod mikroskopem.

Pro testování byly nastaveny následující parametry:

- Testovací vzdálenost trnu od povrchu DPS: 150 μm
- Testovací rychlost 16,7: $\mu\text{m/s}$
- Vzdálenost posunu trnu po odtržení SMD: 500 μm

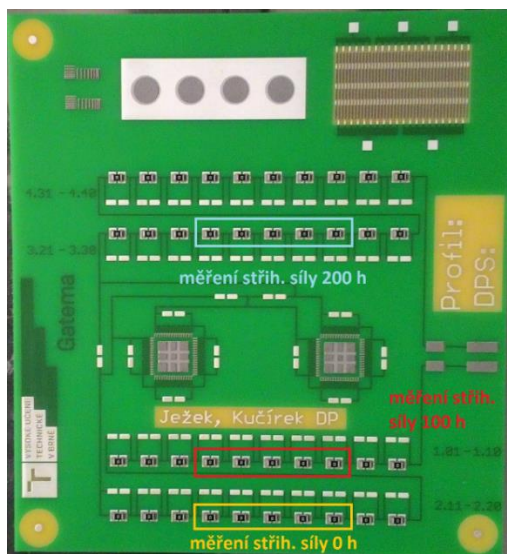


Obr. 27: Měření střihové síly na zařízení Dage PC 2400

Celkově bylo na 32 DPS testováno střihem 160 SMD rezistorů - 5 rezistorů/DPS, pájených v sekci 1 i 2. Na obr. 28 je přehled, které rezistory byly trhány v časech 0, 100 a 200 h.

Tab. 8 uvádí průměrné hodnoty naměřené síly ve střihu při stárnutí 0 h (pro 100 a 200 h v příloze). Z tabulky plyne, že pevnost střih. síly je pro P1 a P2 u PÚ ImSn větší než ENIG, P3 je velikost střihové síly stejná a u P4 vykazuje ENIG větší pevnost. Vyplývající poznatek je, že PÚ ImSn vykazuje vyšší hodnoty v pevnosti pro teplotní profily s nižším $Q_{\eta 1}$ a naopak PÚ

ENIG vykazuje vyšší hodnoty v pevnosti pro teplotní profily $Q\eta_1$. Zároveň se pevnost spoje ImSn s dodaným $Q\eta_1$ nemění. Dále je vidět přírůstek ± 5 % pevnosti po dvojitém přetavení.



Obr. 28: Přehled měření střihové síly na DPS při stárnutí 0, 100 a 200 h

Tab. 8: Průměrná hodnota střihové síly pro 1 a 2 přetavovací cykly; stárnutí 0 h

		1x reflow		2x reflow		přírůstek po 2x reflow	
		Ø F	σ	Ø F	σ	ΔF	ΔF
		[N]		[N]		[N]	[%]
P1	ImSn	39,02	2,911	41,05	5,139	2,030	5,202
	ENIG	31,73	1,760	33,28	3,373	1,550	4,885
	ΔF _{S-A} [N]	7,290	1,151	7,770	1,766		
	ΔF _{S-A} [%]	18,68	39,53	18,93	34,36		
P2	ImSn	43,00	2,302	44,42	4,048	1,420	3,302
	ENIG	38,22	2,651	40,70	3,689	2,480	6,093
	ΔF _{S-A} [N]	4,780	-0,349	3,720	0,359		
	ΔF _{S-A} [%]	11,116	-15,15	8,37	8,87		
P3	ImSn	41,37	4,690	43,00	3,836	1,630	3,940
	ENIG	41,23	3,723	47,39	3,288	6,160	14,94
	ΔF _{S-A} [N]	0,140	0,967	-4,390	0,548		
	ΔF _{S-A} [%]	0,338	20,61	-10,21	14,29		
P4	ImSn	39,21	3,541	41,08	3,364	1,870	4,769
	ENIG	44,68	4,417	46,55	4,467	1,870	4,185
	ΔF _{S-A} [N]	-5,470	-0,876	-5,470	-1,103		
	ΔF _{S-A} [%]	-13,95	-24,75	-13,32	-32,80		

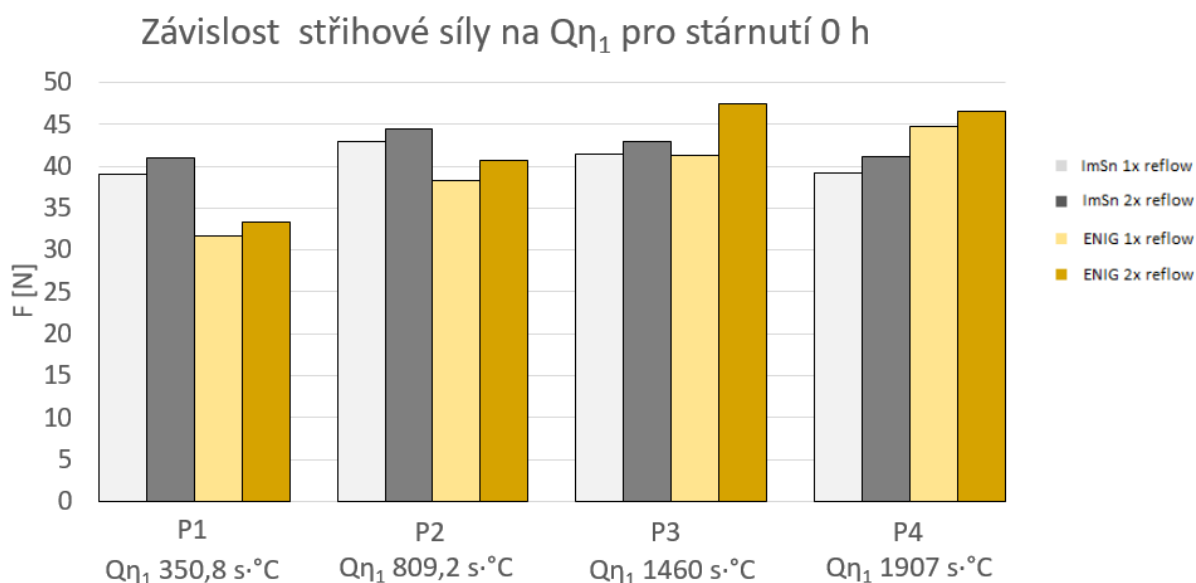
Z dílčích měření pro stárnuté vzorky 0, 100 a 200 h byla vytvořena pro větší přehlednost a porovnání komplexní tabulka hodnot stříhové síly (tab. 9).

Tab. 9: Komplexní přehled průměrné hodnoty stříhové síly; stárnutí 0, 100 a 200 h

		stárnutí 0 h		stárnutí 100 h		stárnutí 200 h					
		počet přetavení									
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
		Ø F	Ø F	Ø F	Ø F	Ø F	Ø F	ΔF ₀₋₂₀₀			
		[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]		[%]	
P1	ImSn	39,02	41,05	38,82	35,99	55,06	46,74	16,04	5,692	41,12	13,87
	ENIG	31,73	33,28	31,05	34,78	42,13	46,65	10,40	13,37	32,79	40,17
	ΔF _{S-A} [N]	7,290	7,770	7,770	1,210	12,93	0,093				
	ΔF _{S-A} [%]	18,68	18,93	20,02	3,36	23,48	0,20				
P2	ImSn	43,00	44,42	38,80	35,19	61,34	51,62	18,34	7,204	42,64	16,22
	ENIG	38,22	40,70	39,32	39,99	50,09	54,05	11,87	13,35	31,07	32,79
	ΔF _{S-A} [N]	4,780	3,720	-0,520	-4,800	11,24	-2,421				
	ΔF _{S-A} [%]	11,12	8,375	-1,340	-13,64	18,32	-4,690				
P3	ImSn	41,37	43,00	38,51	37,34	57,16	55,39	15,79	12,39	38,18	28,80
	ENIG	41,23	47,39	40,85	40,10	49,78	62,26	8,547	14,87	20,73	31,38
	ΔF _{S-A} [N]	0,140	-4,390	-2,340	-2,760	7,387	-6,875				
	ΔF _{S-A} [%]	0,338	-10,21	-6,076	-7,392	12,92	-12,41				
P4	ImSn	39,21	41,08	34,44	34,73	56,45	58,65	17,24	17,57	43,97	42,76
	ENIG	44,68	46,55	41,69	39,92	61,90	55,28	17,22	8,734	38,55	18,76
	ΔF _{S-A} [N]	-5,470	-5,470	-7,250	-5,190	-5,453	3,361				
	ΔF _{S-A} [%]	-13,95	-13,32	-21,05	-14,94	-9,66	5,73				

Obr. 29 znázorňuje závislost stříhové síly na dodaném $Q\eta$ pro nestárnuté vzorky. Pro PÚ ImSn dosahuje nejvyšší hodnota síly v P2, s dodaným integrálem pak lineárně klesá. Zároveň u všech profilů je přírůstek síly asi o 5 %.

Pro PÚ ENIG dochází se zvyšujícím se integrálem k lineárnímu růstu stříhové síly, přičemž také vždy pro druhý průchod pecí vykazují spoje asi o 5 % vyšší pevnost. Tato vlastnost je dána prorůstáním IMC vrstvy u druhého průchodu skrz první vrstvu, která ve výsledku zvyšuje již zmíněnou pevnost spoje.



Obr. 29: Závislost střižové síly na $Q\eta_1$ pro stárnutí 0 h

Po stárnutí 200 h (obr. 30) vykazují pájené spoje přírůstek pevnosti v poměrně širokém intervalu 5,7 – 18,34 N (13,9 – 42,6 %). Ani v jednom případě nedošlo k degradaci pevnosti pájeného spoje. Během pájení přetavením se vytvořila tenká tloušťka intermetalické vrstvy. Její růst byl následně urychlen difuzí při zvýšené teplotě 100 °C.

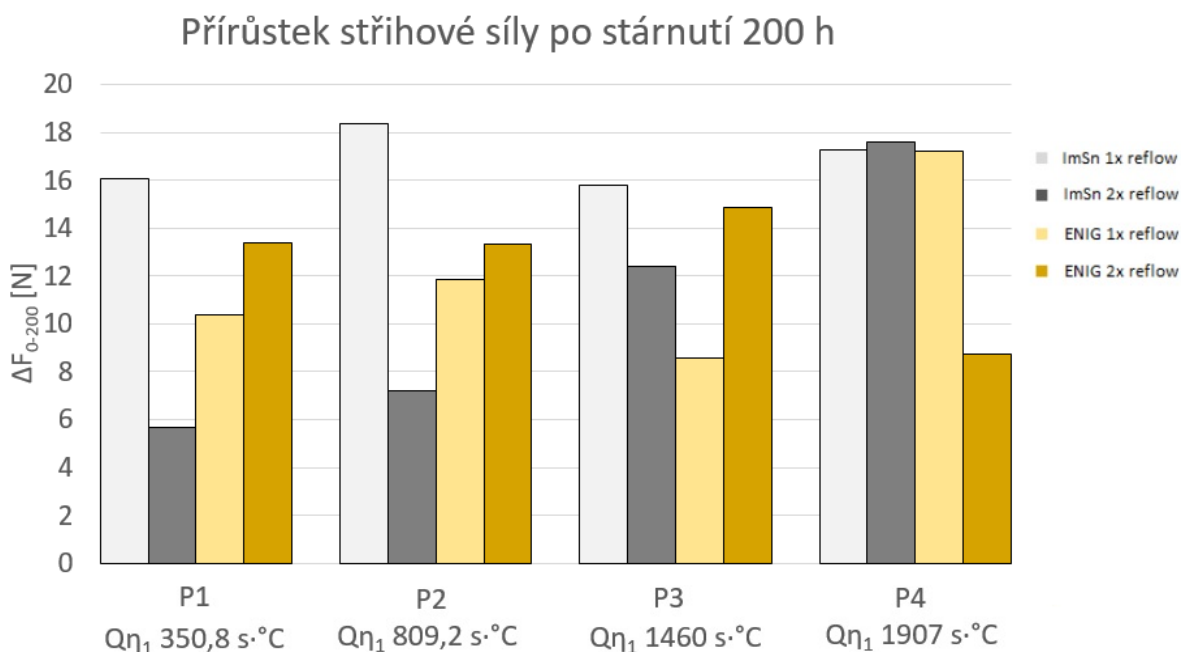
PÚ ImSn:

- Pro jeden přetavovací cyklus je přírůstek pevnosti v závislosti na dodaném $Q\eta_1$ konstantní, tzn. $Q\eta_1$ nemá na přírůstek pevnosti vliv.
- U dvojitého přetavení je znatelný zvyšující se lineární přírůstek pevnosti v závislosti na dodaném integrálu teploty a času.
- Zároveň platí, že pro P1 - P3 u dvojnásobného přetavení jsou změřeny poloviční přírůstky pevnosti, naopak u P4 je přírůstek síly větší o 2 N pro dvojité přetavení.

PÚ ENIG:

- U jednoho přetavovacího cyklu, P1 – P3 je přírůstek pevnosti konstantní, k dvojnásobnému růstu dochází s nejvyšším $Q\eta_1$.
- Pro dvojnásobné přetavení v rozmezí P1 – P3 také platí konstantní přírůstek, s nejvyšším $Q\eta_1$ dochází k dvojnásobnému poklesu.

Z naměřených hodnot dále platí, že s rostoucím $Q\eta_1$ klesá komplexně difference mezi jedním a dvěma přetavovacími cykly a oběma PÚ.



Obr. 30: Závislost přírůstku stříhové síly na $Q\eta_1$ pro stárnutí 200 h

9.1 Poškození spoje po namáhání stříhem

Po destruktivní zkoušce namáhání stříhem dochází na rozhraní pájecí plošky, pájeným spojem a terminálem součástky k poškození. To lze s pomocí mikroskopu sledovat a vyhodnotit. Bylo definováno několik typů poškození:

- 1 – odtržení pájecí plošky od FR-4
- 2 – odtržení pájky od jedné, příp. obou pájecích plošek
- 3 – přetržení pájky ve spoji
- 4 – odtržení pájky od terminálu součástky
- 5 – kombinace 2 + 3: odtržení pájky od pájecí plošky a přetržení pájky ve spoji
- 6 – kombinace 3 + 4: odtržení pájky od terminálu součástky a přetržení pájky ve spoji
- 7 – prasknutí SMD pouzdra bez poškození pájky
- 8 – prasknutí SMD pouzdra a přetržení pájky ve spoji
- 9 – prasknutí SMD pouzdra a odtržení pájky od jedné nebo obou pájecích plošek

Tabulka 10 uvádí přehled poškození po testování. Ani v jednom případě nedošlo k poruše č. 1, tj. odtržení pájecí plošky od FR-4, což značí, že zvětšení pájecích plošek bylo vhodné. Dále ani v jednom případě nedošlo k poruchám 7 a 9 (prasknutí SMD pouzdra bez

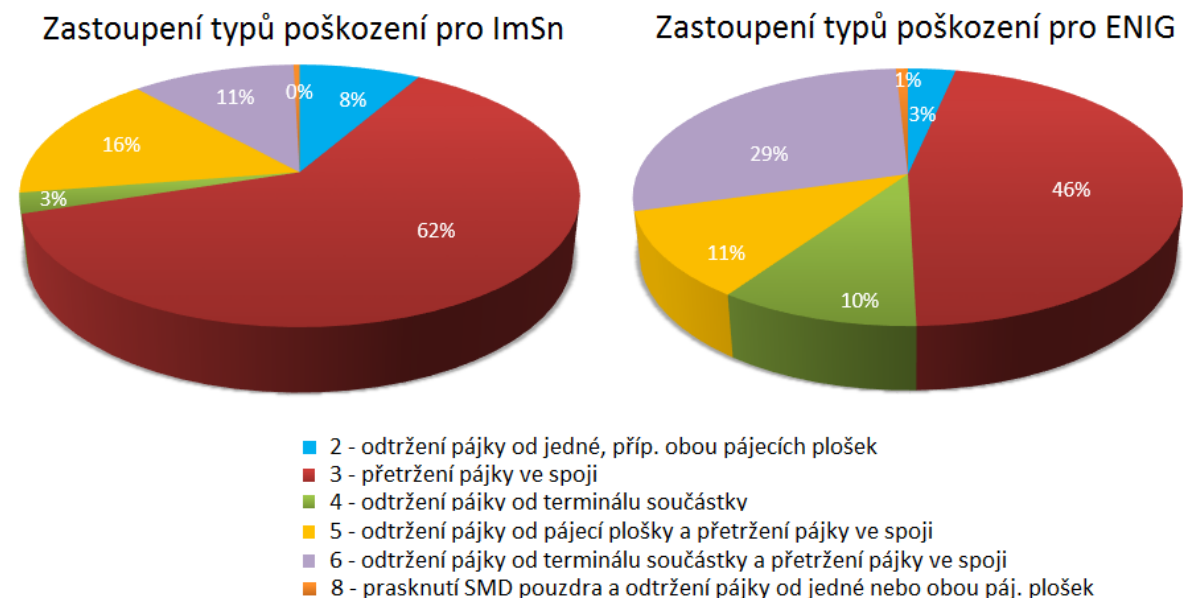
poškození pájky; prasknutí SMD pouzdra a odtržení pájky z 1 nebo obou pájecích plošek). Proto v tabulce 10 čísla poruch nejsou zahrnuta. Výskyt defektů je procentuálně zastoupen přibližně stejnou měrou u jednoho a obou přetavovacích cyklů i ve stárnutí 0, 100 i 200 h, proto je možné vytvořit komplexní graf (obr. 31).

Polovina poruch vznikla při poškození č. 3 - přetržení pájky ve spoji. To značí, že povrchové úpravy pájecích plošek i terminálu součástky dobře reagují s tavidly.

Druhou nejčastější poruchou (pro ENIG) bylo č. 6 – odtržení pájky od terminálů součástky a přetržení pájky ve spoji. Tato porucha se nejčastěji vyskytovala u profilů P1 a P2. Příčinou bude zřejmě nízká doba $Q\eta_2$, kdy tavidlo nedostatečně reagovalo s terminálem.

Defekty č. 2 - odtržení pájky od jedné, příp. obou pájecích plošek, č. 4 - odtržení pájky od terminálu součástky a č. 5 - odtržení pájky od pájecí plošky a přetržení pájky ve spoji se vyskytují okolo 10 %. Především u profilů P1 a P2. Příčinou bude opět zřejmě nízká doba $Q\eta_2$, kdy tavidlo nedostatečně reagovalo s terminálem.

Naopak nejméně poruch bylo vykázáno č. 8 - prasknutím pouzdra součástky. Pouze v 1 % případů. Příčinou prasknutí pouzdra mohlo být pootočení součástky a při pohybu testovacího trnu následné bodové, nikoli plošné, rozložení síly.



Obr. 31: Procentuální zastoupení poškození pro obě PÚ

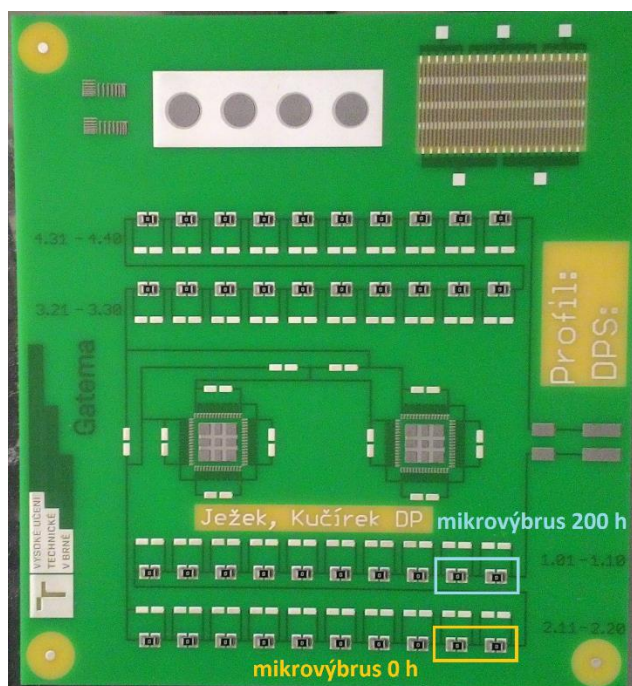
Tab. 10: Komplexní přehled poruch při stárnutí 0, 100 a 200 h

		stárnutí 0 h									
		P1		P2		P3		P4			
		ImSn	ENIG	ImSn	ENIG	ImSn	ENIG	ImSn	ENIG	Σ_{ImSn}	Σ_{ENIG}
1 x reflow	2	2								2	0
	3	2	2	7	6	4	5	8	6	21	19
	4	1	4	1		1				3	4
	5	3				3	1	1		7	1
	6	2	4	2	4	2	4	1	3	7	15
	8								1	0	1
2 x reflow	2	1			1					1	1
	3	8		7	5	6	5	3	9	24	19
	4		3	1		1				2	3
	5		1		2	1	3	4		5	6
	6	1	6	2	1	2	2	2	1	7	10
	8				1			1		1	1
		stárnutí 100 h									
		P1		P2		P3		P4			
		ImSn	ENIG	ImSn	ENIG	ImSn	ENIG	ImSn	ENIG	Σ_{ImSn}	Σ_{ENIG}
1 x reflow	2	2	3							2	3
	3	5	2	6	6	8	9	8	6	27	23
	5	1	1	2	1	2		2	3	7	5
	6	2	4	2	3		1		1	4	9
2 x reflow	2	1	4	3						4	4
	3	3	4	4	6	10	6	7	8	24	24
	5	4		2	2		2	2	1	8	5
	6	2	2	1	2		2	1	1	4	7
		stárnutí 200 h									
		P1		P2		P3		P4			
		ImSn	ENIG	ImSn	ENIG	ImSn	ENIG	ImSn	ENIG	Σ_{ImSn}	Σ_{ENIG}
1 x reflow	2	3								3	0
	3	3	3	8		8	6	9	3	28	12
	4		1	1	4				3	1	8
	5	3	3		2	2	2			5	7
	6	1	3	1	4		2	1	4	3	13
2 x reflow	2	4		4						8	0
	3	1		4	2	10	4	9	8	24	14
	4		6		1		1		1	0	9
	5	5		1			2			6	2
	6		4	1	7		3	1	1	2	15

10 MIKROVÝBRUSY

Pro zkoumání vnitřní struktury (v řezu) pájeného spoje bylo potřeba vytvořit několik mikrovýbrusů. Jedná se o destruktivní metodu, proto se tato metoda používá při vyhodnocování vzorků až jako poslední. Mikrovýbrus je možné vyhodnotit pomocí optického nebo elektronového mikroskopu.

Konkrétně byl zkoumán P1 a P4 při jedno a dvojnásobném přetavovacím cyklu s oběma povrchovými úpravami. Celkem bylo vytvořeno a vyhodnoceno 16 vzorků mikrovýbrusů, přičemž 8 vzorků bylo nestárnutých, které byly následně porovnávány s 8 vzorky stárnutými po 200 h při teplotě 100 °C. Nestárnuté vzorky byly odebrány po změření odporu ze sekce 1 (rezistory č. 1.01 – 2.20) a vzorky pro stárnuté vzorky po změření odporu ze sekce 2 (rezistory č. 3.21 – 4.40), viz obr. 32. Komplexní přehled DPS s odebranými vzorky uvádí tabulka 11.



Obr. 32: Umístění vzorků pro mikrovýbrusy

Tab. 11: Přehled DPS s odebranými vzorky pro mikrovýbrusy

	stárnutí 0 h		stárnutí 200 h	
	S 1. 1. 1	S 1. 2. 1	S 1. 1. 1	S 1. 2. 1
ImSn	S 4. 1. 1	S 4. 2. 1	S 4. 1. 1	S 4. 2. 1
ENIG	A 1. 1. 1	A 1. 2. 1	A 1. 1. 1	A 1. 2. 1
	A 4. 1. 1	A 4. 2. 1	A 4. 1. 1	A 4. 2. 1

10.1 Výroba mikrovýbrusu

Postup výroby mikrovýbrusu je shrnut v následujících krocích:

- Oddělení plochy vzorku od zbytku DPS. Oddělení proběhlo pomocí přímé brusky s diamantovým kotoučem. Výhodou je rychlé a přesné dělení. Pro dělení lze použít listovou pilku, frézku nebo pákové nůžky (u pákových nůžek hrozí, že pnutím čelistí může vzniknout příčná síla, která by mohla mít negativní vliv na delaminaci Cu motivu od FR-4 i na poškození pájeného spoje).
- Na stěny formy je z důvodu pozdějšího snadného vyjmutí vzorku aplikován separátor.
- Vzorek je očištěn od prachu a jiných nečistot při dělení pomocí vzduchu pod tlakem (ev. isopropylalkoholem).
- Vzorky je do formy nutné umístit kolmo ke dnu formy – je nutné předejít při zalévání či tuhnutí směsi k jeho pohybu a také ke zkreslení při zkoumání pod mikroskopem. K tomuto účelu byly použity pomocné plastové úchyty na obr. 33.



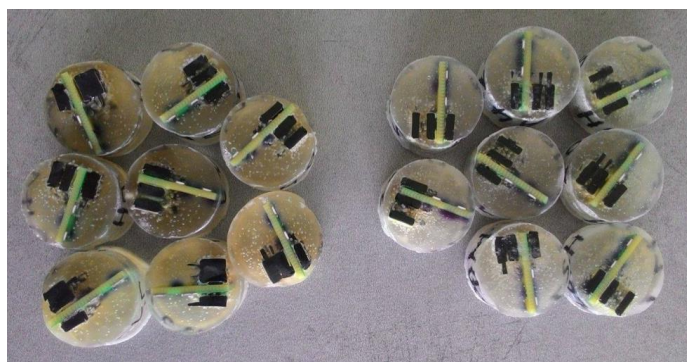
Obr. 33: Připravené vzorky pro mikrovýbrus s plastovými úchyty; stárnutí 0 h

- Zalévací směs je použit Dentacryl (methylmetakrylátová pryskyřice). Směs se připraví smícháním jeho dvou složek v poměru 2:1 - 2 díly prášku a 1 díl kapaliny. Míchání probíhá po dobu 15 minut. Je nutné míchat pomalu, aby se předešlo nežádoucímu vzniku bublin. Zalévat pomalu, aby směs zatekla do všech zákoutí na vzorku a nevznikly kavity. [28]
- Tuhnutí Dentacrylu v pokojové teplotě asi 10 hodin. Tuhnutí je možné urychlit v komoře se zvýšenou teplotou (např. při 60 °C je Dentacryl vytvrzen za 1 hodinu).
- Po vytvrzení Dentacrylu (obr. 34) je vzorek vyjmut z formy a očištěn od zbytků separátoru. Případně lze použít i čištění ultrazvukem.



Obr. 34: Vzorky mikrovýbrusů po vytvrzení, před vyjmutím z formy; stárnutí 0 h

- Broušení vzorků pomocí zařízení Metasimex s brusnými papíry pod vodou. Nejdříve broušení nahrubo brusným papírem hrubosti 220 až po sledovanou oblast. Následně jemnozrnými brusnými papíry 500 a 1000. Po broušení jemnozrným brusným papírem hrubosti 1000 je vzorek umístěn do ultrazvukové čističky Kraitex K 10LE [29] (odstranění abrazivních částic 18 μm) a následně vyleštěn pomocí leštícího kotouče a leštících past (velikost abrazivních částic 1 μm).
- Pro zvýraznění IMC struktury v pájeném spoji mikrolept 10 vteřin ve směsi kyseliny dusičné (5 %) a metanolu (95 %) + ultrazvukové čištění v deionizované vodě. Hotové vzorky mikrovýbrusů na obr. 35.



Obr. 35: Mikrovýbrusy – vlevo 0 h, vpravo 200 h

10.2 Vyhodnocení mikrovýbrusů optickým mikroskopem

Měření tloušťky IMC všech mikrovýbrusů proběhlo pomocí optického mikroskopu AmScope osazeným digitální kamerou MU1000 při zvětšení 500x.

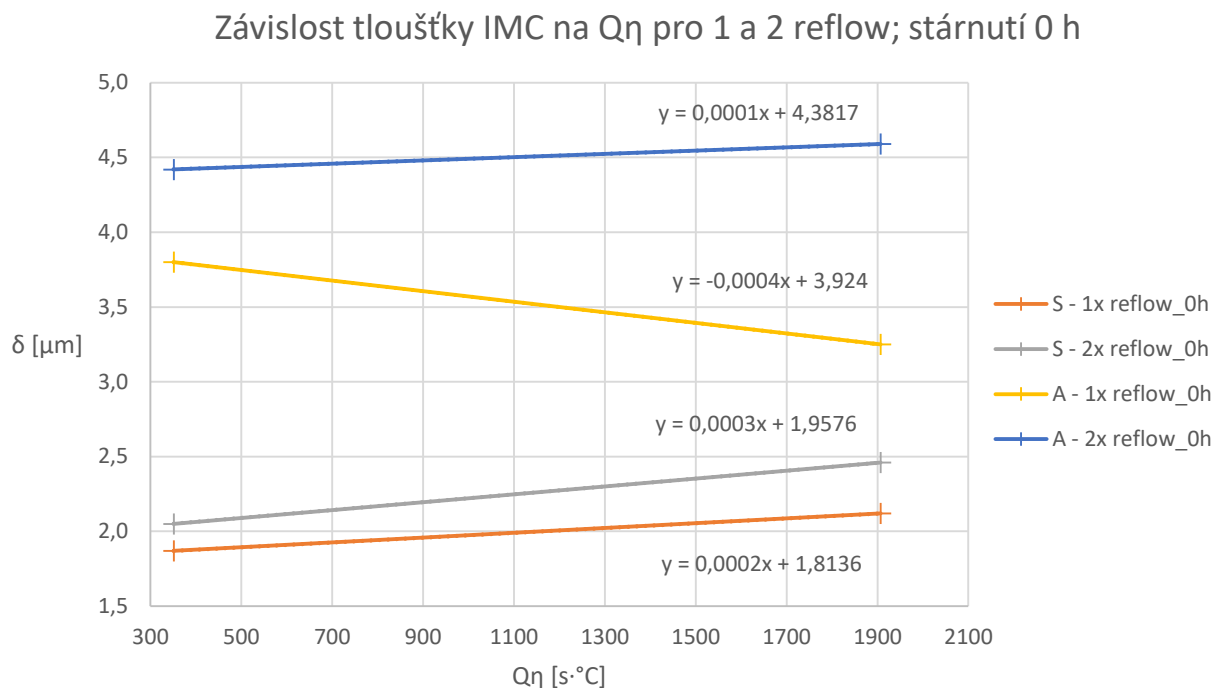
Průměrná tloušťka IMC byla vypočítána z 5ti měření, neboť tloušťka IMC vrstvy byla značně nehomogenní. Naměřené výsledky jsou obsaženy v tab. 12.

Tloušťka IMC vrstvy před stárnutím pro obě PÚ roste s $Q\eta_1$: ImSn z 1,870 na 2,460 μm a pro PÚ ENIG z 3,8 až po 4,59 μm . Přírůstek po stárnutí 200 h se pohybuje u obou PÚ mezi 0,330 a 0,860 μm . Důvodem větší δ PÚ Imerzním zlatem je, že Nikl obsažený v PÚ tvoří vrstvu cca 4 μm mezi Cu a BiSn pájkou.

Obr. 36 popisuje lineární závislost růstu IMC pro P1 a P4 (integrálu $Q\eta_1$), jeden a dva průchody při stárnutí 0 h. Při dvojitým dodání $Q\eta$ dochází k přírůstku vrstvy (podle PÚ) 6,5 – 41,2 %. Nelze tedy aplikovat sčítání $Q\eta$. Nárůst tloušťky je zřejmě způsoben růstem nové IMC vrstvy přes původní vrstvu vzniklou prvním přetavením (částečné rozpuštění původní IMC vrstvy a růst nové, tlustší, nelze uvažovat, neboť teplota tavení těchto intermetalických sloučenin výrazně převyšuje teploty dosažené při přetavení. Významný je i samotný mechanismus difuze a morfologie IMC. U vzorku s PÚ ENIG a jedním teplotním cyklem dochází k lineárnímu poklesu tloušťky intermetalické vrstvy. Příčinou je pravděpodobně příliš nízký $Q\eta_1$ a $Q\eta_2$. Důsledkem se vytvořila příliš nehomogenní vrstva, která byla následně měřena v oblastech s již zmíněnou vysokou nehomogenitou.

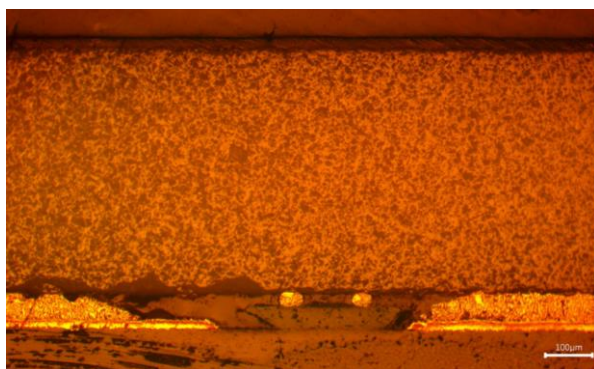
Tab. 12: Průměrná tloušťka IMC pro stárnutí 0 a 200 h

$Q\eta_1$ [s·°C]	č. DPS	stárnutí		$\Delta_{0-200} \delta$ [%]	$\Delta_{0-200} \delta$ [μm]	č. DPS	stárnutí		$\Delta_{0-200} \delta$ [%]	$\Delta_{0-200} \delta$ [μm]
		0 h	200 h				0 h	200 h		
350,8	S 1. 1. 1	1,870	2,200	0,330	17,65	A 1. 1. 1	3,800	4,550	0,750	19,74
	S 1. 2. 1	2,050	2,620	0,570	27,80	A 1. 2. 1	4,420	4,850	0,430	9,729
	$\Delta_{1-2\text{Reflow}}$ [μm]	0,180	0,420			$\Delta_{1-2\text{Reflow}}$ [μm]	0,620	0,300		
	$\Delta_{1-2\text{Reflow}}$ [%]	9,626	19,09			$\Delta_{1-2\text{Reflow}}$ [%]	16,32	6,593		
1907	S 4. 1. 1	2,120	2,560	0,440	20,75	A 4. 1. 1	3,250	3,770	0,520	16,00
	S 4. 2. 1	2,460	3,320	0,860	34,96	A 4. 2. 1	4,590	5,160	0,570	12,42
	$\Delta_{1-2\text{Reflow}}$ [μm]	0,340	0,760			$\Delta_{1-2\text{Reflow}}$ [μm]	1,340	1,390		
	$\Delta_{1-2\text{Reflow}}$ [%]	16,04	29,69			$\Delta_{1-2\text{Reflow}}$ [%]	41,23	36,87		

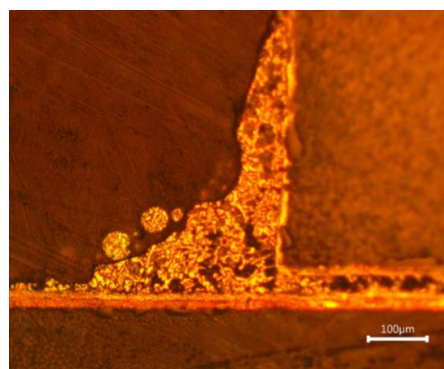


Obr. 36: Graf závislosti IMC na $Q\eta$ pro 1 a 2 přetavovací cykly; stárnutí 0 h

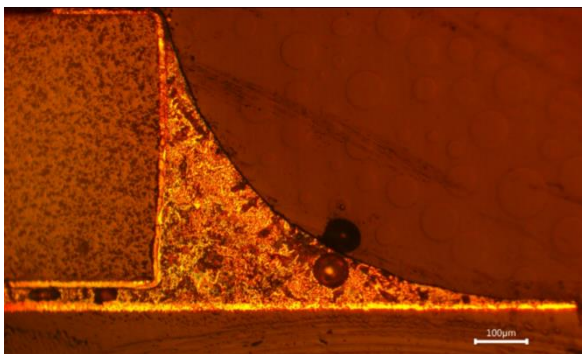
Na obr. 37 jsou nalezeny vyskytující se defekty při zvětšení 100x (detail dutiny na obr. 37d je zvětšen 500x) – kulička pájky pod SMD pouzdrem, kulička pájky pro během nízkého přetavení, dutina v pájce, nehomogenita přetavení, dobré smáčení.



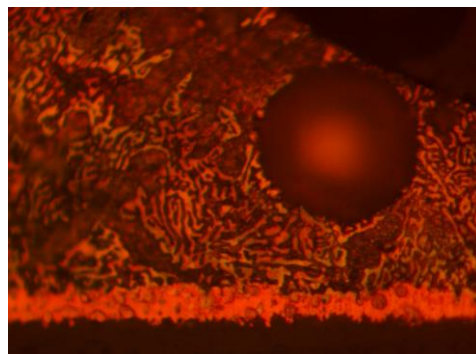
a) A 1. 1. 1_0h_kuličky pájky pod SMD



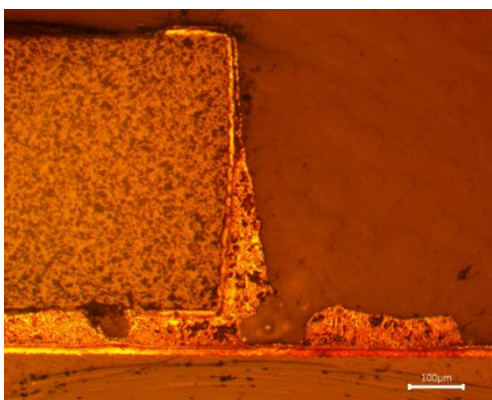
b) A 1. 1. 1_200h_kuličky pájky na spoji



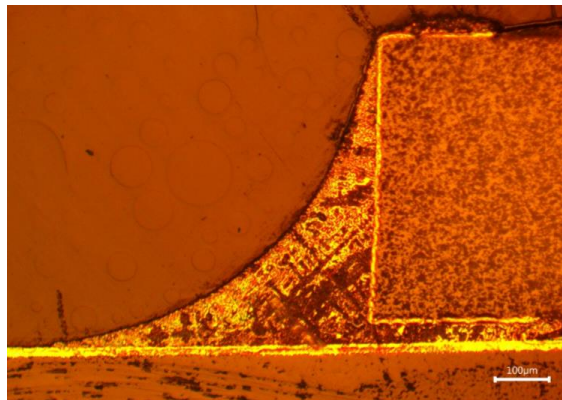
c) S 4. 1. 1_0h_dutina v pájce



d) detail dutiny (500x), struktura BiSn pájky



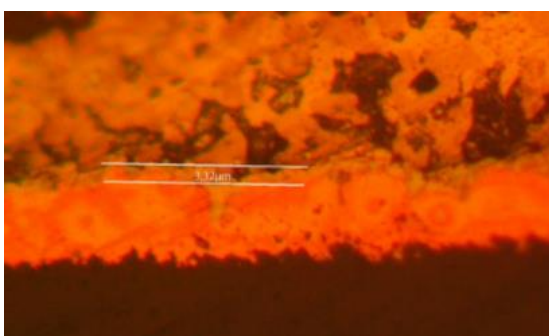
e) A 1. 1. 1_0h_nehomogenní smáčení



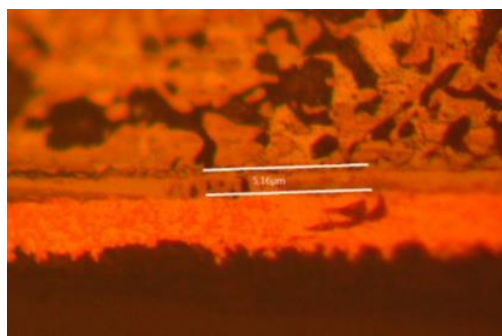
f) A 4. 1. 1_0h_dobré smáčení

Obr. 37: Defekty během měření IMC; zvětšení 100x

Detail značně nehomogenní IMC struktury, při zvětšení 500x, pro obě PÚ je vidět na obr. 38.



a) S 4. 2. 1_200h_δ 3,32 μm



b) A 4. 2. 1_200h_δ 5,16 μm

Obr. 38: Měření tloušťky IMC optickým mikroskopem

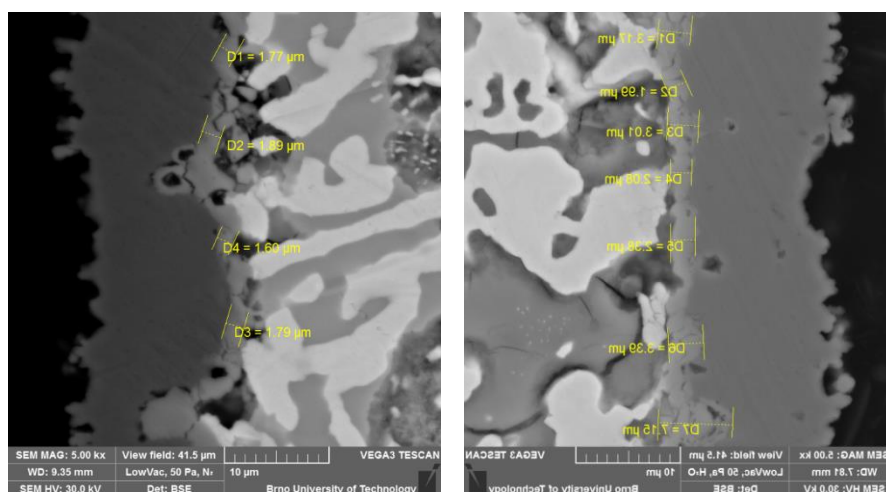
10.3 Vyhodnocení mikrovýbrusů pomocí SEM

U části vzorků mikrovýbrusů stárnutých 200 h (tab. 13) byl pro přesnější vyhodnocení použit elektronový mikroskop VEGA3XMU (zdroj elektronů katoda LaB₆ – Lanthan hexaborid).[27] Pozorování proběhlo v tlaku nízkého vakua – 50 Pa a vodních par, protože ve vakuu by docházelo k nabíjení nevodivých vzorků. Měření a pozorování IMC proběhlo v režimu zpětně odražených elektronů, které přenáší materiálové informace o složení vzorku. U vzorků S 4. 1. 1 a A 4. 1. 1 byla provedena energiově disperzní rentgenová mikroanalýza, jenž určuje zmapování rozložení prvků na povrchu vzorku a jejich hmotnostní podíl.

Tab. 13: Měření vzorků mikrovýbrusů pro SEM

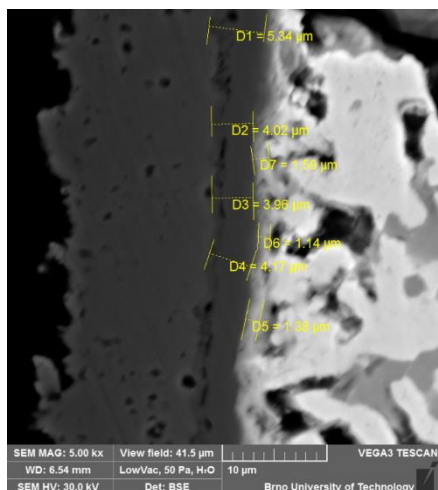
stárnutí 200 h		EDS
P1	A 1. 1. 1	
	A 1. 2. 1	
P4	S 4. 1. 1	
	S 4. 2. 1	A 4. 2. 2

Na obr. 39 je vidět měřená tloušťka IMC pro dané vzorky. Dále lze pozorovat její značnou nehomogenitu. Průměrná tloušťka IMC odpovídá výsledkům naměřeným optickým mikroskopem.

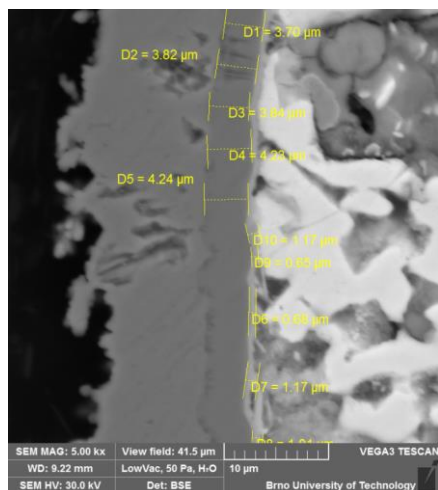


vlevo: S 4. 1. 1

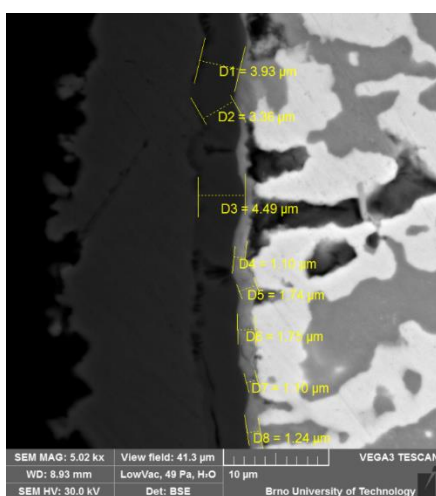
vpravo: S 4. 2. 1



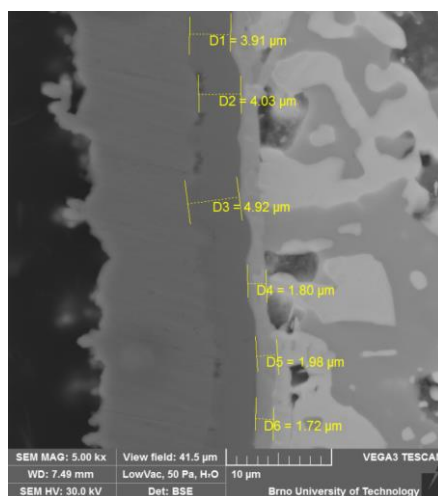
vlevo: A 1. 1. 1



vpravo: A 1. 1. 1



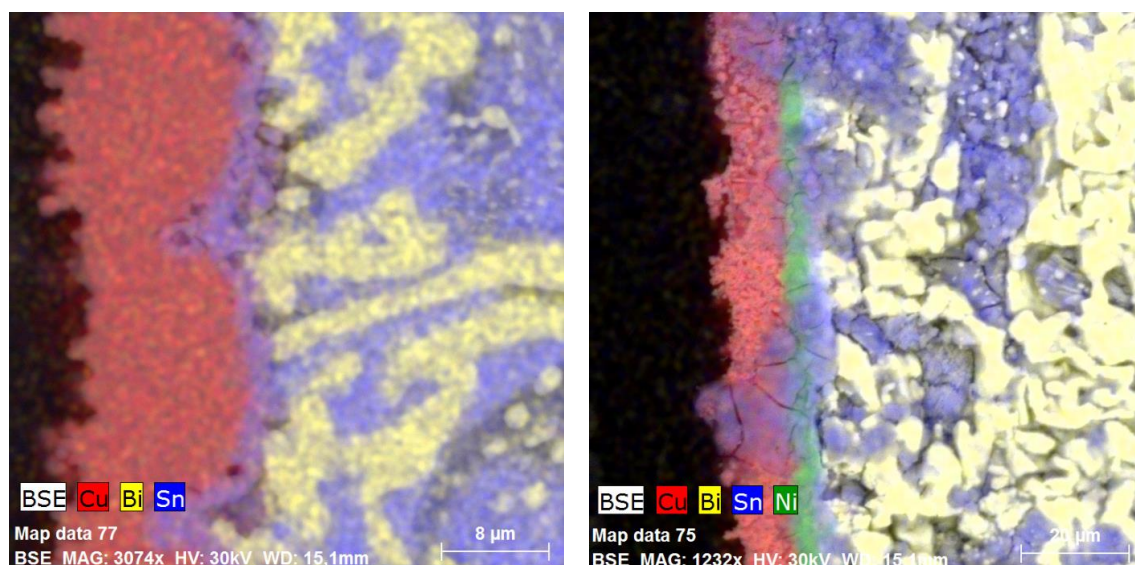
vlevo: A 4. 1. 1



vpravo: A 4. 2. 1

Obr. 39: Tloušťka IMC v režimu BSE

Rozložení prvků pro obě PÚ je na obr. 40. U ImSn je patrné, jak cín z pájky difunduje do měděné plošky a vznikají IMC sloučeniny Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 . ENIG tvoří mezi měděnou ploškou vrstvičku niklu (cca 4 μm), na které je navázána tenká vrstvička (cca 1 μm) cínu. Vzniká tak IMC Ni_3Sn_4 a zároveň část cínu difunduje do měděné plošky, kde vzniká IMC Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 . Vrstva zlata rozpuštěného v pájce byla stopově zaznamenána.



vlevo: S 4. 1. 1

vpravo: A 4. 1. 1

Obr. 40: Rozložení prvků IMC pro ImSn a ENIG

Materiálová analýza byla provedena u vzorků S 4. 1. 1 a A 4. 1. 1 vždy pro oblast měděné plošky, IMC a pájky (obr. 41). Výsledky analýzy potvrdily předpoklady týkající se složení jednotlivých oblastí:

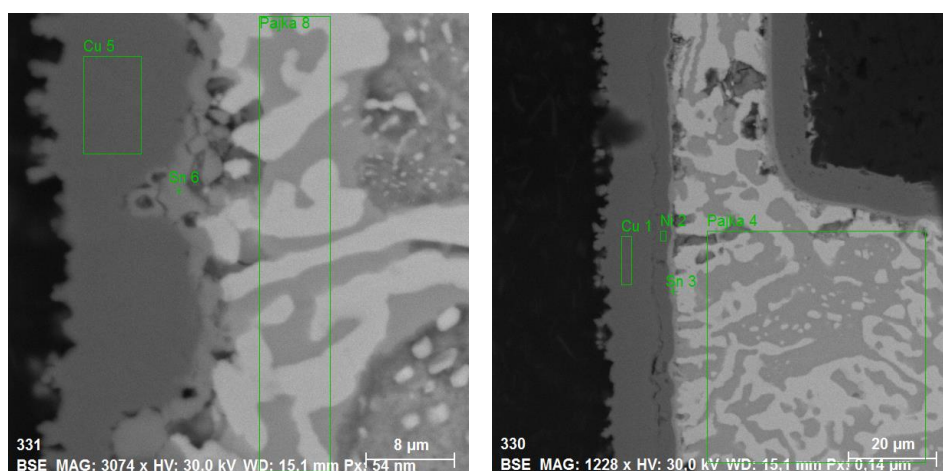
PÚ ImSn (obr. 42 až 44):

- V oblasti měděné plošky je nejvyšší objemové zastoupení mědi 69 %, prvky Bi a Sn prodifundovaly ve 3 objemových procentech. Na rozhraní Cu-Sn se tvoří IMC Cu_3Sn .
- Pro oblast IMC je zjištěno prvkové zastoupení Sn 36 %, Cu 21 % a Bi 3 %, což odpovídá sloučenině Cu_6Sn_5 .
- V oblasti pájky bylo zjištěno Sn 43 %, Bi 41 % a Cu 2 %, což značí, že sledovaná oblast je i ve skutečnosti pájecí slitina.
- Při zjišťování materiálové analýzy byly zjištěny další prvky, například C je dán znečištěním materiálu nebo Si může být prvek základního materiálu (ZM).

PÚ ENIG (obr. 45 – 48):

- V oblasti měděné plošky je opět nejvyšší objemové zastoupení mědi 67 %, prvky Bi a Sn prodifundovaly ve 3 objemových procentech a Ni 1 %, vznikají IMC Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 .
- Oblast niklu obsahuje 56 objemových procent, Bi a Sn 6% a Cu 4 %.

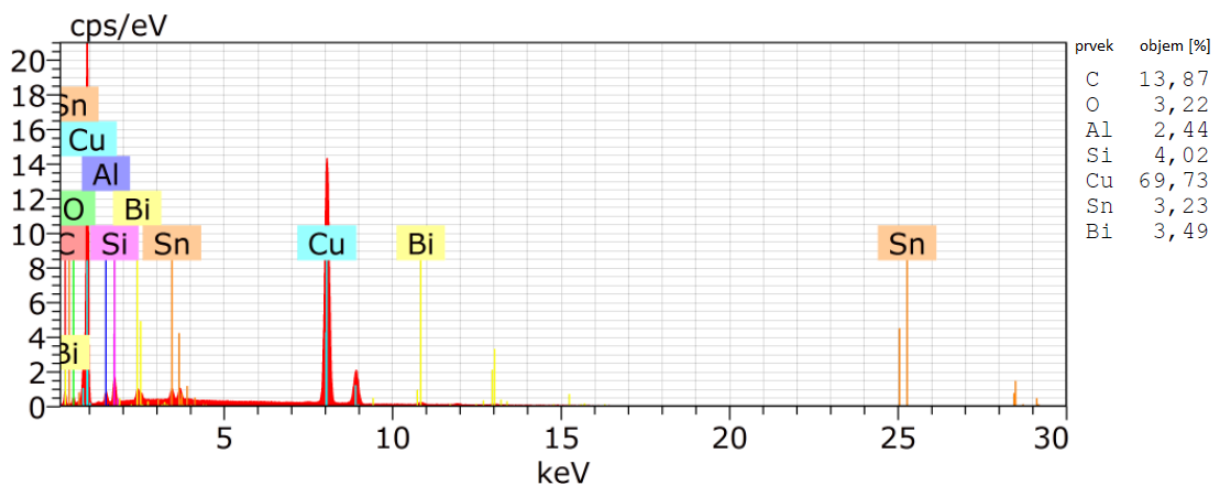
- Pro oblast cínu bylo zjištěno Sn 29 %, 35 % Bi, Ni 6% a Cu 4 %. Dále je nalezeno 1 % Au prodifundované z PÚ. V oblasti niklu a cínu se převážně tvoří IMC Ni_3Sn_4 .
- V oblasti pájky je obsaženo Sn 47 %, Bi 37 % a Cu, Ni po 1 %.
- Opět při zjišťování materiálové analýzy byly zjištěny další prvky, například C je dán znečištěním materiálu nebo Si může být prvek základního materiálu (ZM). Stopové množství Au bylo rozpuštěno v oblasti Sn, v pájce nikoliv. Dále bylo zjištěno stopové množství Br (samozhášecí přísady v FR-4) a Al (abrazivo na bázi Al_2O_3).



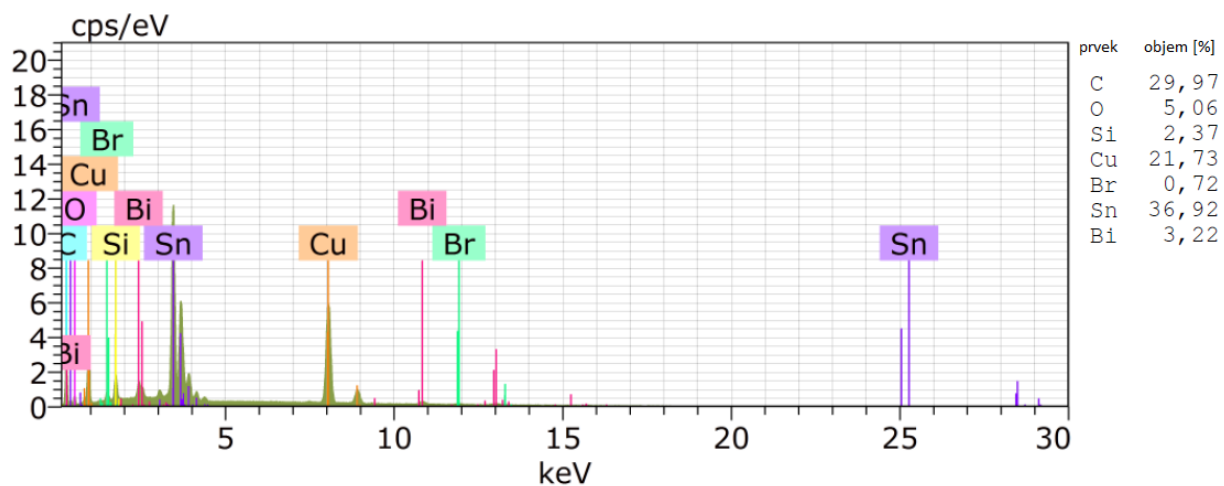
vlevo: S 4. 1. 1

vpravo: A 4. 1. 1

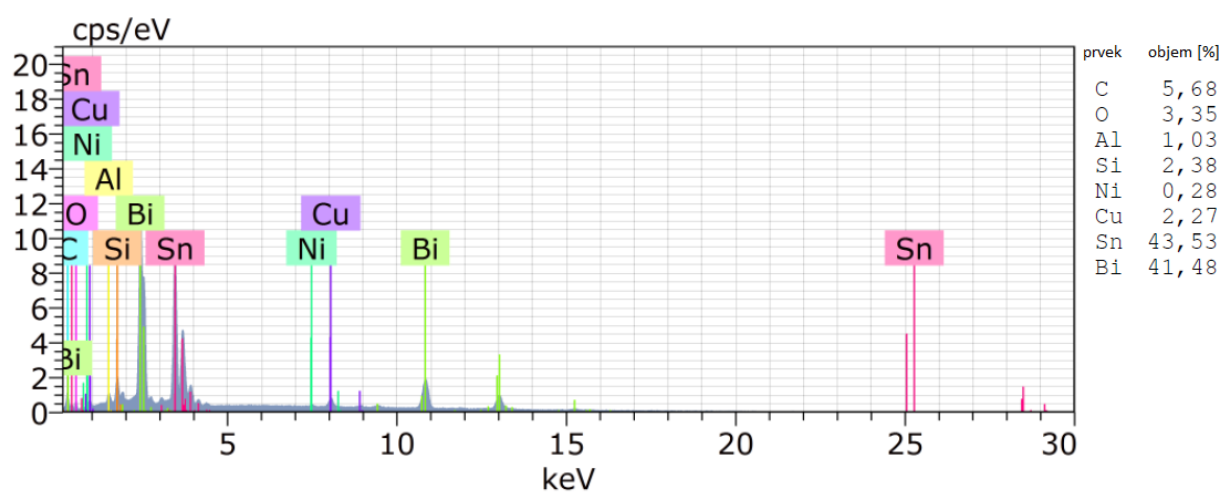
Obr. 41: Sledovaná oblast pro EDS mikroanalýzu



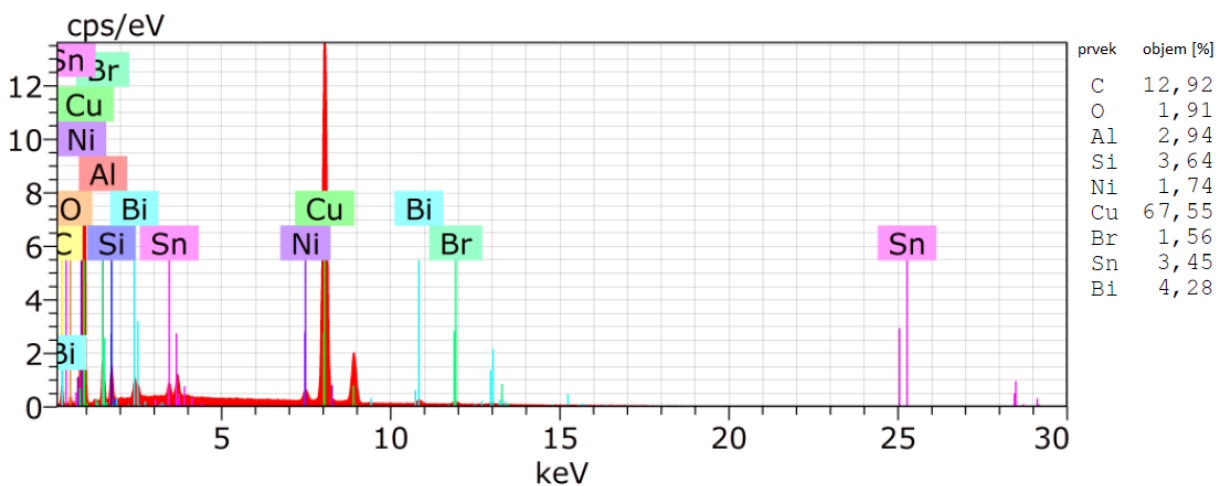
Obr. 42: Prvková analýza S 4. 1. 1 – oblast Cu



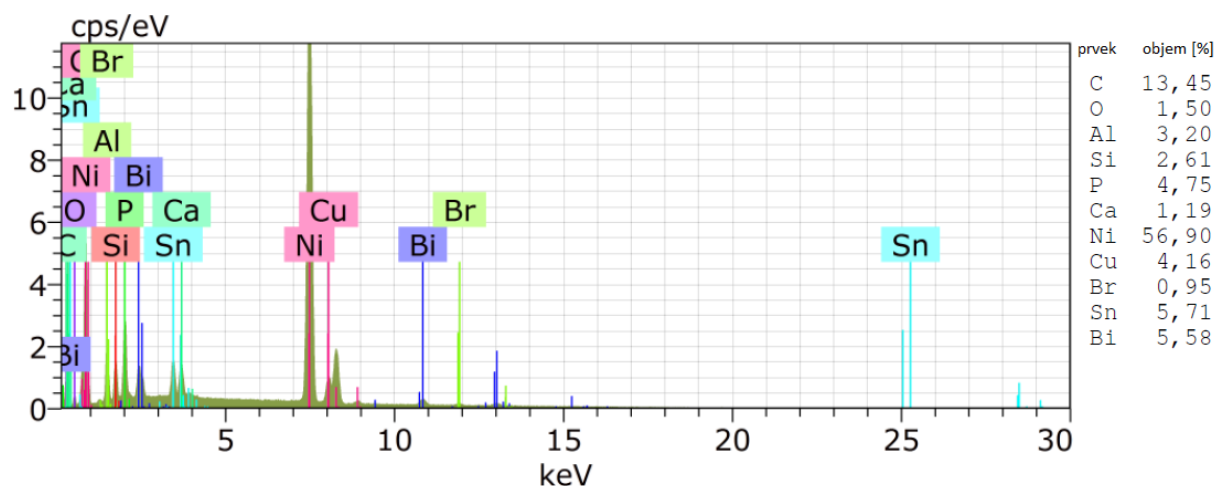
Obr. 43: Prvková analýza S 4. 1. 1 – oblast Sn



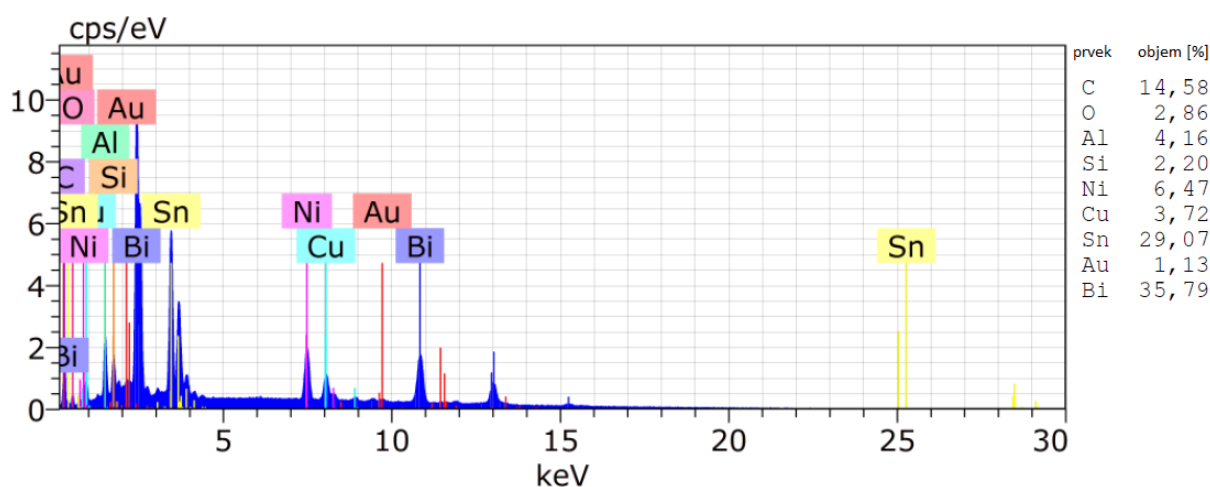
Obr. 44: Prvková analýza S 4. 1. 1 – oblast pájky



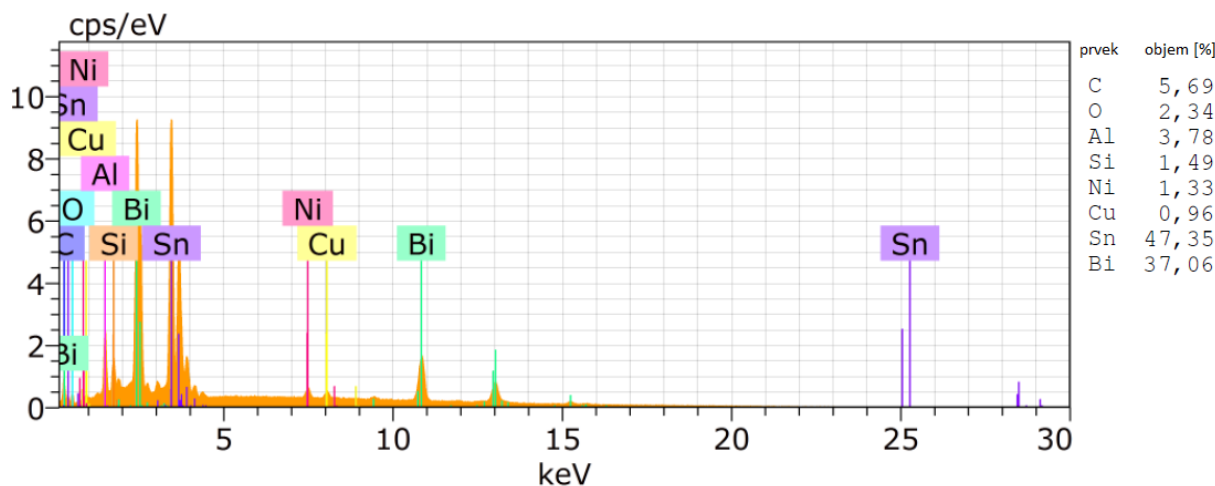
Obr. 45: Prvková analýza A 4. 1. 1 – oblast Cu



Obr. 46: Prvková analýza A 4. 1. 1 – oblast Ni



Obr. 47: Prvková analýza A 4. 1. 1 – oblast Sn



Obr. 48: Prvková analýza A 4. 1. 1 – oblast pájky

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá vztahy mezi integrálem teploty a času $Q\eta$, jeho vlivem na změny intermetalické sloučeniny v čase a jeho vlivu na kvalitu pájeného spoje za použití Bi58Sn42 pájecí pasty, která díky nižší teplotě tavení řeší problémy součástek s malou tepelnou odolností a také dochází k úspoře energie vytápění pecí.

Teoretická část diplomové práce popisuje vlastnosti pájecích slitin olovnatých, bezolovnatých, i pájecích slitin s bismutem, analyzuje problematiku teplotních profilů. Popisuje tvorbu a vlastnosti intermetalických sloučenin a jejich vztahu s integrálem teploty a času.

Praktická část řeší zadanou problematiku od modifikovaného návrhu DPS až po destruktivní sledování pevnosti pájených spojů. Pro polovinu DPS byla zvolena povrchová úprava imerzním cínem a pro druhou polovinu chemickým niklem s imerzním zlatem. Nastavení 4 RTS teplotních profilů s širokým procesním oknem, osazení nulovými SMD rezistory v pouzdře 0805 a pájení přetavením proběhlo ve spolupráci s firmou Honeywell. K pájení přetavením byla použita Bi58Sn42 pájecí pasta. Přetavení v peci proběhlo pro polovinu testovacích DPS jedním průchodem, druhou dvěma průchody. Dle normy IPC-A-610 byla vyhodnocena kvalita pájených spojů. Vzorky byly zkoumané v souvislosti s izotermickým stárnutím při teplotě 100 °C po dobu 200 h, kdy byla měřena změna odporu pájených spojů. Vyhodnocení závislosti IMC na $Q\eta$ dále proběhlo zkouškami stříhovým namáháním s doplňkovým vyhodnocením následných poškození pájeného spoje po stříhovém namáhání. Tloušťka IMC vrstvy byla u všech vzorků mikrovýbrusů určena optickým mikroskopem. Pro část vzorků mikrovýbrusů byla tloušťka IMC vrstvy změřena elektronovým mikroskopem, včetně prvkové mikroanalýzy a vyhodnocení zastoupení jednotlivých prvků.

Obecně pro vyhodnocení kvality pájení pro obě PÚ platí, že u P1 jsou pro spolehlivé přetavení nedostatečné hodnoty $Q\eta_1$ a $Q\eta_2$. S dodaným vyšším množstvím tepla u profilu P2 dochází ke zlepšení. Teplotní profily P3 a P4 již vykazují hladké a lesklé spoje (jako SnPb slitiny) s ideálním smáčením a minimálním výskytem kuliček pájky neovlivňujícím minimální elektrickou izolační vzdálenost. Ani v jednom případě nebyl odhalen další defekt jako zkrat, krápník, pavučina, můstek nebo tombstoning. U všech 4 teplotních profilů a obou povrchových úprav se vyskytuje nerovnoměrně rozložené množství tavidlových zbytků, což značí pravděpodobně nízký $Q\eta_2$ (nedostatečný čas na zreagování tavidla).

Nejnižší hodnotu odporu vykazuje měření nestárnutých vzorků, a to v rozmezí 1,431 až 1,463 Ω . Při srovnání rozdílu odporu před stárnutím a po stárnutí dochází k lineárnímu přírůstku

odporu propojení o $0,005 - 0,018 \Omega$ ($0,4 - 1,2 \%$). Dále platí, že změna odporu je u obou PÚ pro druhý průchod menší než pro první průchod. Příčinou může být růst intermetalické vrstvy formou difuze, kdy dochází ke zpomalení růstu odporu (při vyšších hodnotách $Q_{\eta 1}$ se tvoří tlustší IMC a zpomaluje další růst IMC a tím i růst odporu). Výše popsané skutečnosti neplatí pro P4, tedy největší integrál $Q_{\eta 1}$.

Pro nestárnuté pájené spoje platí, že PÚ ImSn vykazuje vyšší hodnoty v pevnosti pro teplotní profily s nižším $Q_{\eta 1}$ a naopak PÚ ENIG vykazuje vyšší hodnoty v pevnosti pro teplotní profily s vyšším $Q_{\eta 1}$. Zároveň se pevnost spoje ImSn s dodaným $Q_{\eta 1}$ nemění. Dále je vidět přírůstek $\pm 5 \%$ pevnosti po dvojitým přetavení. Tato vlastnost může být dána prorůstáním IMC vrstvy u druhého průchodu skrz první vrstvu, která ve výsledku zvyšuje již zmíněnou pevnost spoje.

Po stárnutí 200 h vykazují pájené spoje přírůstek pevnosti v poměrně širokém intervalu $5,7 - 18,34 \text{ N}$ ($13,9 - 42,6 \%$). Ani v jednom případě nedošlo k degradaci pevnosti pájeného spoje. Během pájení přetavením se vytvořila tenká tloušťka IMC. Její růst byl následně urychlen difuzí při zvýšené teplotě $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Z naměřených hodnot dále platí, že s rostoucím $Q_{\eta 1}$ klesá komplexně difference mezi jedním a dvěma přetavovacími cykly a oběma PÚ.

Výskyt typů poškození je procentuálně zastoupen přibližně stejnou měrou u jednoho a obou přetavovacích cyklů i ve stárnutí 0, 100 i 200 h. Polovina poškození vznikla při přetržení pájky ve spoji. To značí, že povrchové úpravy pájecích plošek i terminálu součástky dobře reagují s tavídky. Naopak nejméně poruch bylo vykázáno prasknutím pouzdra součástky. Pouze v 1% případů. Příčinou prasknutí pouzdra mohlo být pootočení součástky a následné bodové, nikoli plošné, rozložení síly při pohybu testovacího trnu. Ani v jednom případě nedošlo k odtržení pájecí plošky od FR-4, což značí, že zvětšení pájecích plošek bylo vhodné.

Průměrná tloušťka IMC byla vypočítána z 5ti měření, neboť tloušťka IMC vrstvy byla značně nehomogenní. Tloušťka IMC vrstvy před stárnutím pro obě PÚ roste s $Q_{\eta 1}$: ImSn z $1,870$ na $2,460 \mu\text{m}$ a pro PÚ ENIG z $3,8$ až po $4,59 \mu\text{m}$. Přírůstek po stárnutí 200 h se pohybuje u obou PÚ mezi $0,330$ a $0,860 \mu\text{m}$. Dále lze pozorovat značnou nehomogenitu. Měřená průměrná tloušťka IMC pomocí optického mikroskopu odpovídá výsledkům naměřeným elektronovým mikroskopem.

Dosažené výsledky jsou v diplomové práci průběžně zhodnoceny v dílčích kapitolách. Vzhledem k obsáhlosti dané problematiky nelze stanovit z výsledků dosažených v diplomové práci jednoznačný závěr. Vlastnosti BiSn pájecí pasty by bylo vhodné detailněji prozkoumat z hlediska vibrační odolnosti a také cyklickými zkouškami při dlouhodobějším stárnutí.

LITERATURA

- [1] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Vyd. 1. Brno: VUTIUUM, 2006, 379 s. ISBN 80-214-3292-6.
- [2] STARÝ, Jiří a Miroslav ZATLOUKAL. *Montážní a propojovací technologie*. Brno, 2014. Elektronická skripta MMOT. VUT Brno.
- [3] *Pájení v elektrotechnice* [online]. VUT Brno, 2015 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pajeni-v-elektrotechnice/>. Multimediální učebnice. VUT Brno.
- [4] PROCHÁZKA, M. *Vliv rozdílné tepelné kapacity DPS a součástek na podélný teplotní profil u pájení přetavením – diplomová práce*. Brno 2011. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D. FEKT VUT v Brně.
- [5] YAGEO: RC0805JR-070RL. *YAGEO* [online]. Taiwan: Yageo Corporation, 2017 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://www.yageo.com/documents/recent/PYu-RC_Group_51_RoHS_L_7.pdf
- [6] SANDY-SMITH, Brook, Edward BRIGGS a Ronald C. LASKY. Avoiding thermal damage to components and substrates. *EPP EUROPE: Electronics Production and Test* [online]. Leinfelden-Echterdingen, Germany: Katja Kohlhammer, 2016, 2016(November), 66 [cit. 2016-12-11]. ISSN 1618-5587. Dostupné z: <https://www.smarticle.com/app/#/html5/d5db5e54c7/W6TNHkheObIWt/page/22>
- [7] HRABÁK, Petr. *Vznik a růst intermetalických sloučenin u bezolovnatých pájených spojů* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/15300/BP_Hrabak.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Václav Wirth.
- [8] JEŽEK, V. *Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [9] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [10] Qualitek Delta670: datasheet. *Laryo* [online]. Villasanta (Italy): LARYO S.r.L., 2015 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.laryo.it/portale/images/Scheda%20tecnica%20670%20SnBi.pdf>
- [11] Isola DE104: datasheet. *Isola* [online]. Chandler (AZ): Isola Group, 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.isola-group.com/wp-content/uploads/DE104-Laminate-and-Prepreg-Data-Sheet-0317.pdf>

- [12] WEBBER, Allan. MSL Ratings and Reflow Profiles. In: *Texas Instruments* [online]. Dallas: Texas Instruments, 2015 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/spraby1/spraby1.pdf>
- [13] WANG, Xin, Xunping LI, Kailin PAN, Bin ZHOU a Tingbiao JIANG. Effect of reflow profile parameters on shear performance of Sn3.0Ag0.5Cu/Cu solder joint. In: *2014 10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS)* [online]. IEEE, 2014, s. 691-693 [cit. 2016-12-12]. DOI: 10.1109/ICRMS.2014.7107286. ISBN 978-1-4799-6632-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7107286/>
- [14] WIRTH, Vaclav, Karel RENDL a Frantisek STEINER. Effect of multiple reflow cycles on intermetallic compound creation. In: *2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* [online]. IEEE, 2015, s. 226-230 [cit. 2016-12-12]. DOI: 10.1109/ISSE.2015.7247995. ISBN 978-1-4799-8860-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7247995/>
- [15] TAO BO, YIN ZHOUPING, DING HAN a WU YIPING. Mechanical reliability estimation for μ BGA solder joints based on heating factor Q. In: *2008 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging* [online]. IEEE, 2008, s. 1-4 [cit. 2016-11-29]. DOI: 10.1109/ICEPT.2008.4607120. ISBN 978-1-4244-2739-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4607120/>
- [16] DOSEDLA, M. *Trendy v oblasti pájecích past a vliv nanočástic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2016. 81 s., 9 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [17] KROUPA, A., T. KÁŇA, J. BURŠÍK, A. ZEMANOVÁ a M. ŠOB. Modelling of phase diagrams of nanoalloys with complex metallic phases: application to Ni–Sn. *Phys. Chem. Chem. Phys* [online]. 2015, **17**(42), 28200-28210 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1039/C5CP00281H. ISSN 1463-9076. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5CP00281H>
- [18] OH, C. -S, J. -H SHIM, B. -J LEE a D. -N LEE. Ag - Sn System. In: *NIST: National Institute of Standards and Technology* [online]. Gaithersburg, Maryland: U.S Department of Commerce, 2016 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agsn.html>
- [19] Imerzní cín. *Gatema* [online]. Boskovice: Gatema, 2017 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://pcb.gatema.cz/imerzni-cin/>
- [20] DOSEDLA, M. *Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného bezolovnatého spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2013. 59 s., Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D..

- [21] Isola IS400: datasheet. *Isola* [online]. Chandler (AZ): Isola Group, 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.isola-group.com/wp-content/uploads/IS400-Laminate-and-Prepreg-Data-Sheet-0317.pdf>
- [22] SuperM.O.L.E.® Gold 2: datasheet. *EDC* [online]. Milwaukie (OR): EDC, 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.ecd.com/products/thermal-profilers/supermole-gold-2.aspx>
- [23] Heller 1808EXL: Catalog. *Heller Industries* [online]. Florham Park (NJ): Heller Industries, 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: http://www.hellerindustries.com/pdf/Heller_EXL_Catalog.pdf
- [24] Momentum Compact Printer. *ITW EAE* [online]. Lakeville (MN): ITW EAE, 2016 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.itweae.com/products/printers/momentum-compact>
- [25] KY 8030-3: 3D Solder Paste Inspection. *Koh Young Technology* [online]. Seoul: Koh Young Technology, 2014 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://kohyoung.com/en/ky8030-3/>
- [26] Siemens Siplace X4. *ASM Assembly Systems* [online]. Munich: ASM Assembly Systems GmbH & Co., 2016 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: https://www.siplace.com/addmindms/download.aspx?domid=10&log=1&d_id=5bb5ad00-c226-4ab9-a11d-10e14d3f2883&fdl=0
- [27] VEGA3XMU. *TESCAN: PERFORMANCE IN NANOSPACE* [online]. Brno: TESCAN ORSAY HOLDING, 2017 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.tescan.com/en-us/technology/sem/vega3>
- [28] DENTACRYL® technický. *SpofaDental* [online]. Jičín: SpofaDental, 2005 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: http://www.spfadental.com/media/Products/ProductFamily/359/cs-CZ/Documents/32317/Dentacryl_Technicky_IFU_CZ.pdf
- [29] Kraitex K-10LE: ultrazvuková čistička. *KRAINTEK CZECH* [online]. Hradec Králové: KRAINTEK CZECH, 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.kraintek.cz/k10le-nerezova-elektronicke-ovladani-d78.html>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

∇	gradient ($^{\circ}\text{C/s}$)
μBGA	$\mu\text{Ball Grid Array}$ – typ pouzdra čipové součástky
Ag	stříbro – chemická značka
Al	hliník – chemická značka
Au	zlato – chemická značka
Bi	bismut – chemická značka
BiSn	pájecí slitina ve složení bismut, cín
Br	brom – chemická značka
BSE	Back Scattered Electron – zobrazení zpětně odraženými elektrony
C	uhlík – chemická značka
CTE	Coefficient of Thermal Expansion – koeficient teplotní roztažnosti (K^{-1})
Cu	měď – chemická značka
DPS	Deska Plošného Spoje
EDS	Energiově Disperzní Spektrometrie
ENIG	Electroless Nickel Immersion Gold – chemický nikl, imerzní zlato; typ povrchové úpravy pájecích ploch
FR-4	Flame Retardant-4 - typ základního materiálu (ZM) desek plošných spojů
HAL	Hot Air Leveling – typ povrchové úpravy pájecích ploch
IMC	Intermetallic Compound – intermetalická sloučenina
ImSn	Imerzní cín – typ povrchové úpravy pájecích ploch
MTTF	Mean Time To Failure - střední doba do poruchy (hod, cykly)
Ni	nikl – chemická značka
\emptyset	průměr
OSP	Organic Surface Protection – typ ochrany pájecích ploch metodou pokrytí organickými povlaky
Pb	olovo – chemická značka
PÚ	Povrchová Úprava
QFN	Quad Flat No-leads – typ pouzdra čipové součástky
$Q\eta$	integrál teploty a času (s°C)

RSS	Ramp Soak Spike – sedlový teplotní profil
RTS	Ramp To Spike – lineární teplotní profil
SAC	bezolovnatá pájka ve složení Sn, Ag, Cu
SEM	Skenovací Elektronový Mikroskop
Si	křemík – chemická značka
SIR	Surface Insulation Resistance -povrchový izolační odpor
SMT	Surface Mount Technology - technologie povrchové montáže
Sn	cín – chemická značka
SnPb	olovnatá pájka ve složení cín, olovo
SPI	Solder Paste Inspection – kontrola tisku pájecí pasty
T	teplota (°C)
t	čas (s)
TAL	Time Above Liquidus, též označovaný T_L – doba nad liquidem (s)
T_c	teplota čipové součástky (°C)
T_g	teplota skelného přechodu (°C)
T_p	vrcholová teplota (°C)
T_{smax}	mezí maximální teplota pro teplotní vyrovnaní (°C)
T_{smin}	mezí minimální teplota pro teplotní vyrovnaní (°C)
v	rychlost dopravníku (cm/min)
ZM	Základní Materiál
δ	tloušťka intermetalické vrstvy (μm)
Δ	změna hodnoty
σ	směrodatná odchylka

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Obecný teplotní profil RSS pro pájecí slitinu, bez měřítka [12]	13
Obr. 2: Teplotní profil Bi58Sn42 pájecí pasty Delta 670 firmy Qualitek [10].....	14
Obr. 3: IMC rozhraní Cu – Sn [2]	17
Obr. 4: Fázový diagram rozhraní Sn-Cu [7].....	17
Obr. 5: Fázový diagram rozhraní Ni - Sn [17]	18
Obr. 6: Fázový diagram rozhraní Ag – Sn [18].....	18
Obr. 7: Teplotní profil s vyznačením Q_{η}	20
Obr. 8: IMC vrstva pro 4 různé Q_{η} [20].....	22
Obr. 9: Závislost střední doby do poruchy na Q_{η} [15].....	22
Obr. 10: Závislost MTTF na Q_{η} pro μ BGA pouzdra [20]	23
Obr. 11: Motiv testovací DPS [8].....	24
Obr. 12: Neosazené DPS (ImSn vlevo, ENIG vpravo)	25
Obr. 13: Vyrobená DPS pro nastavení teplotních profilů	26
Obr. 14: Vlevo: umístění termočlánků na DPS; vpravo: detail značení termočlánků.....	27
Obr. 15: Parametry pájecí pasty Delta 670.....	30
Obr. 16: Vlevo – MPM Momentum - zařízení pro tisk pájecí pasty; vpravo detail šablony po tisku ...	30
Obr. 17: Graf závislosti poměru relativní četnosti na objemu natisknuté pájecí pasty	31
Obr. 18: Zařízení pro SPI – Koh Young KY 8030-3.....	31
Obr. 19: Vlevo – osazovací automat Siemens Siplace X4; vpravo – detail osazovací hlavy s částečně osazenou DPS	32
Obr. 20: Desetizónová pec Heller 1808EXL.....	32
Obr. 21: Vyhodnocení kvality pájení: SMD detail – kuličky pájky, tavidlové zbytky, smáčení	35
Obr. 22: Vyhodnocení testu přetavení pájecí pasty na natisknuté ploše	35
Obr. 23: Vyhodnocení pájecích plošek QFN	35
Obr. 24: Pájecí plošky pro SMD WAGO.....	35
Obr. 25: Členění sekcí pro měření odporu	36
Obr. 26: Graf přírůstku odporu po stárnutí 200 h.....	37
Obr. 27: Měření stříhové síly na zařízení Dage PC 2400	38
Obr. 28: Přehled měření stříhové síly na DPS při stárnutí 0, 100 a 200 h.....	39
Obr. 29: Závislost stříhové síly na $Q_{\eta 1}$ pro stárnutí 0 h	41
Obr. 30: Závislost přírůstku stříhové síly na $Q_{\eta 1}$ pro stárnutí 200 h.....	42
Obr. 31: Procentuální zastoupení poškození pro obě PÚ	43
Obr. 32: Umístění vzorků pro mikrovýbrusy	45
Obr. 33: Připravené vzorky pro mikrovýbrus s plastovými úchyty; stárnutí 0 h	46
Obr. 34: Vzorky mikrovýbrusů po vytvrzení, před vyjmutím z formy; stárnutí 0h	47

Obr. 35: Mikrovýbrusy – vlevo 0 h, vpravo 200 h.....	47
Obr. 36: Graf závislosti IMC na $Q\eta$ pro 1 a 2 přetavovací cykly; stárnutí 0 h	49
Obr. 37: Defekty během měření IMC; zvětšení 100x	50
Obr. 38: Měření tloušťky IMC optickým mikroskopem	50
Obr. 39: Tloušťka IMC v režimu BSE	52
Obr. 40: Rozložení prvků IMC pro ImSn a ENIG	53
Obr. 41: Sledovaná oblast pro EDS mikroanalýzu.....	54
Obr. 42: Prvková analýza S 4. 1. 1 – oblast Cu.....	54
Obr. 43: Prvková analýza S 4. 1. 1 – oblast Sn	55
Obr. 44: Prvková analýza S 4. 1. 1 – oblast pájky.....	55
Obr. 45: Prvková analýza A 4. 1. 1 – oblast Cu	55
Obr. 46: Prvková analýza A 4. 1. 1 – oblast Ni.....	56
Obr. 47: Prvková analýza A 4. 1. 1 – oblast Sn.....	56
Obr. 48: Prvková analýza A 4. 1. 1 – oblast pájky.....	56

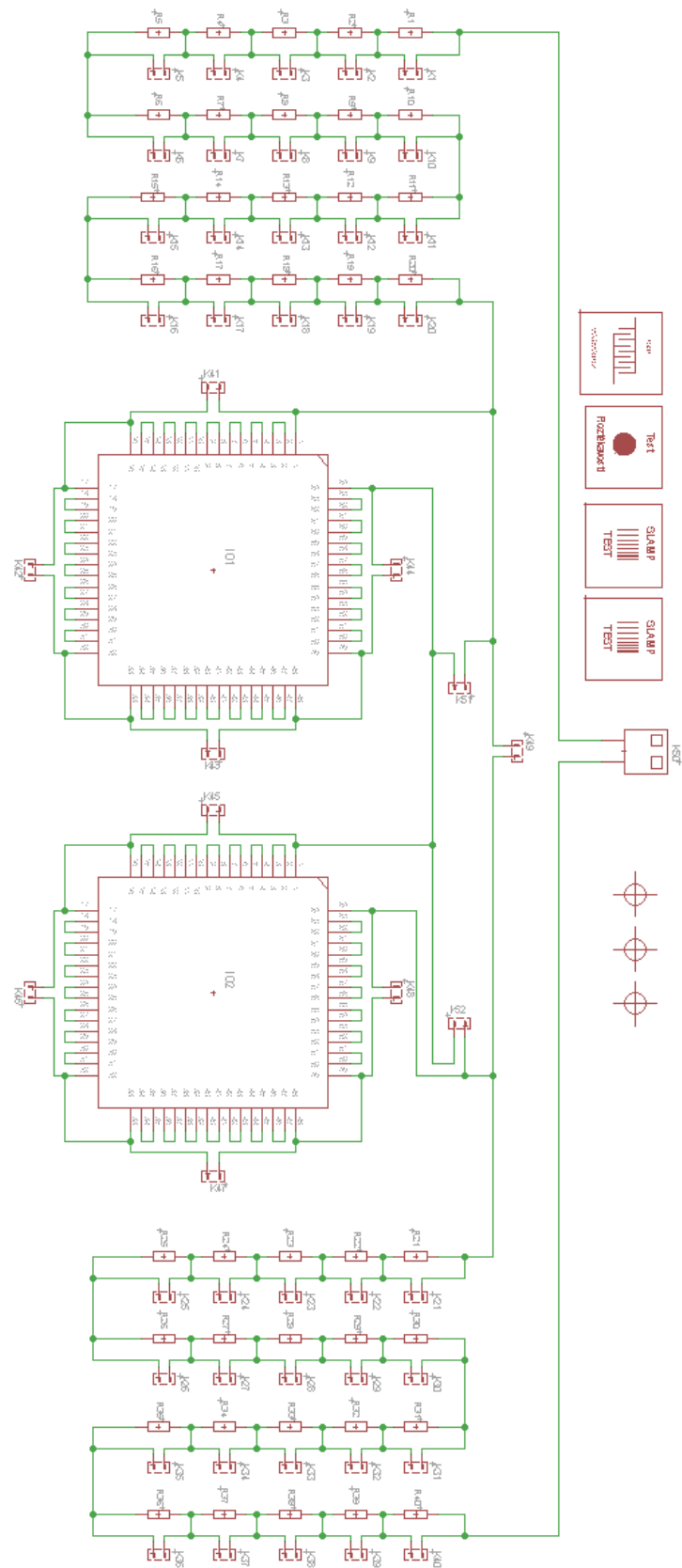
SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Závislost T_p na tloušťce a objemu pouzdra čipové součástky [12]	13
Tab. 2: IMC sloučeniny a jejich tloušťky po pájení a zrychleném stárnutí Sn - Ag, Sn - Cu, SAC 1000 h/125 °C a BiSn 1h/600 °C [7]	16
Tab. 3: Důležité parametry P1 – P4 včetně $Q\eta$	28
Tab. 4: Přehled kódového značení DPS	29
Tab. 5: Výsledky SPI.....	31
Tab. 6: Pořadí testovacích DPS při průchodu přetavovací pecí	33
Tab. 7: Srovnání stárnutí 0, 100 a 200 h.....	37
Tab. 8: Průměrná hodnota stříhové síly pro 1 a 2 přetavovací cykly; stárnutí 0h	39
Tab. 9: Komplexní přehled průměrné hodnoty stříhové síly; stárnutí 0, 100 a 200 h	40
Tab. 10: Komplexní přehled poruch při stárnutí 0, 100 a 200 h.....	44
Tab. 11: Přehled DPS s odebranými vzorky pro mikrovýbrusy	45
Tab. 12: Průměrná tloušťka IMC pro stárnutí 0 a 200 h	48
Tab. 13: Měření vzorků mikrovýbrusů pro SEM	51

SEZNAM PŘÍLOH

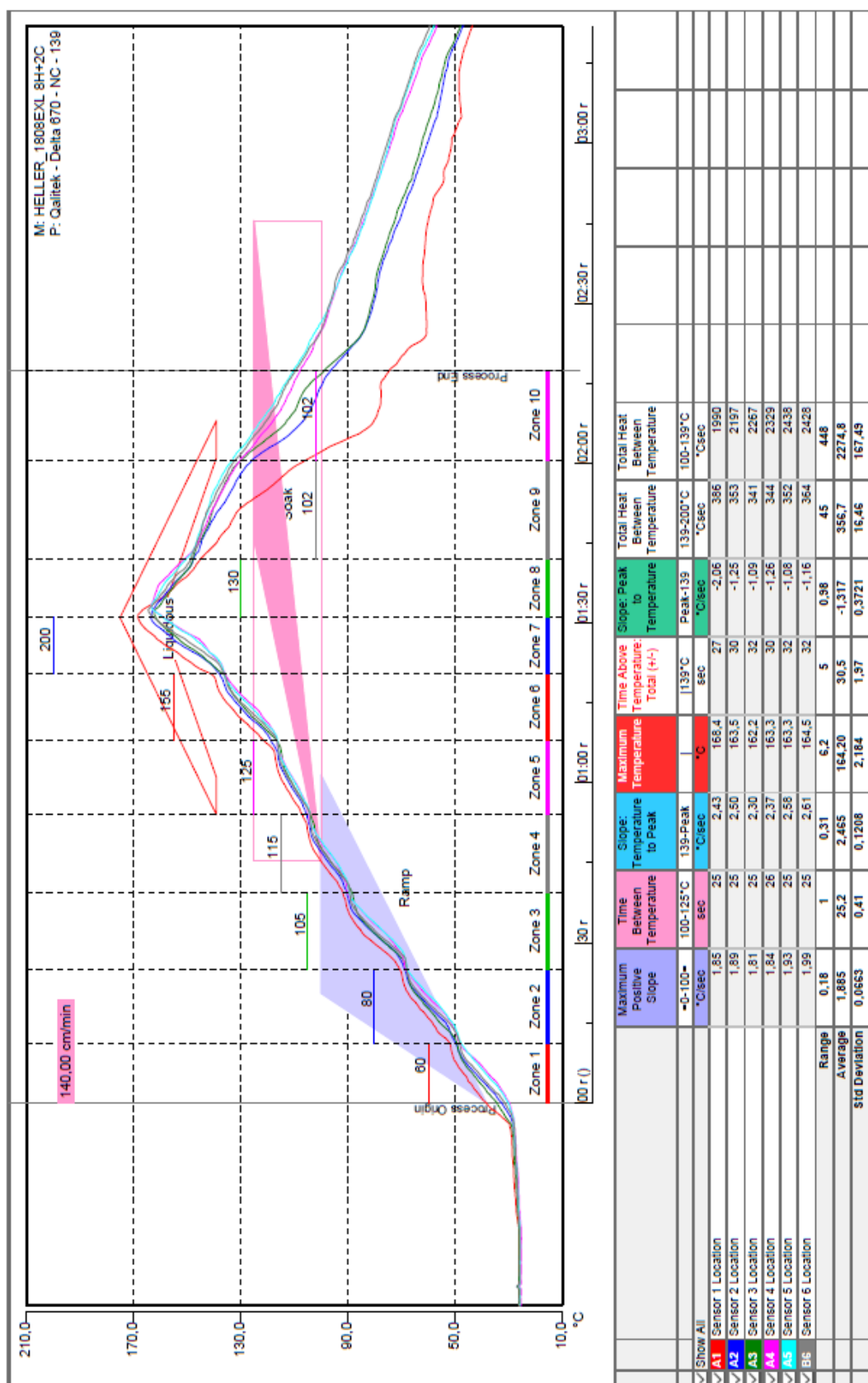
A	Schéma propojení testovací DPS	I
B	Teplotní profily	II
B.1	Teplotní profil P1	II
B.2	Teplotní profil P2	III
B.3	Teplotní Profil P3	IV
B.4	Teplotní profil P4	V
C	Technický list BiSn pájecí pasty Delta 670	VI
D	Měření odporu pájených spojů pro obě sekce; stárnutí 0 h	VIII

A Schéma propojení testovací DPS

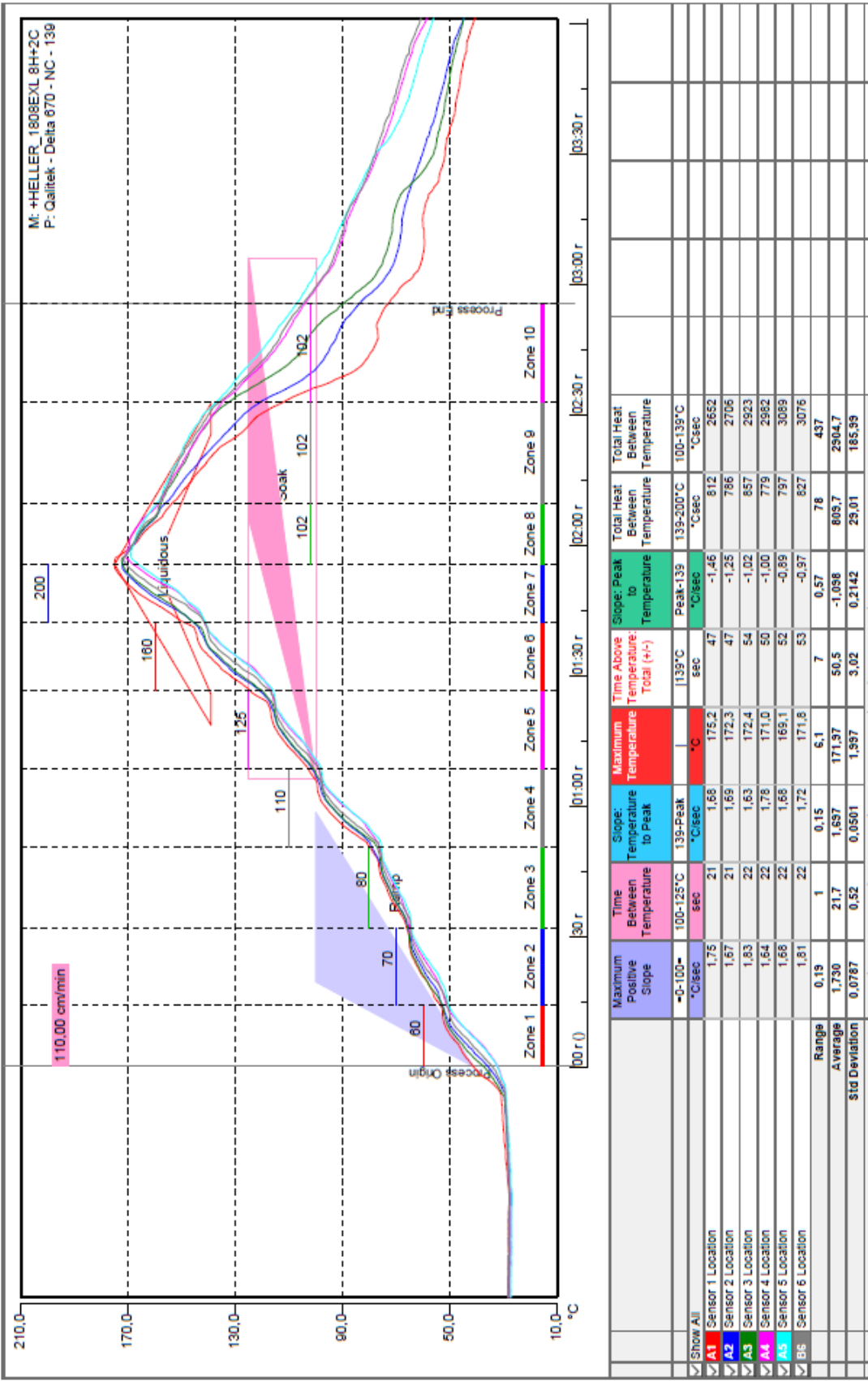


B Teplotní profily

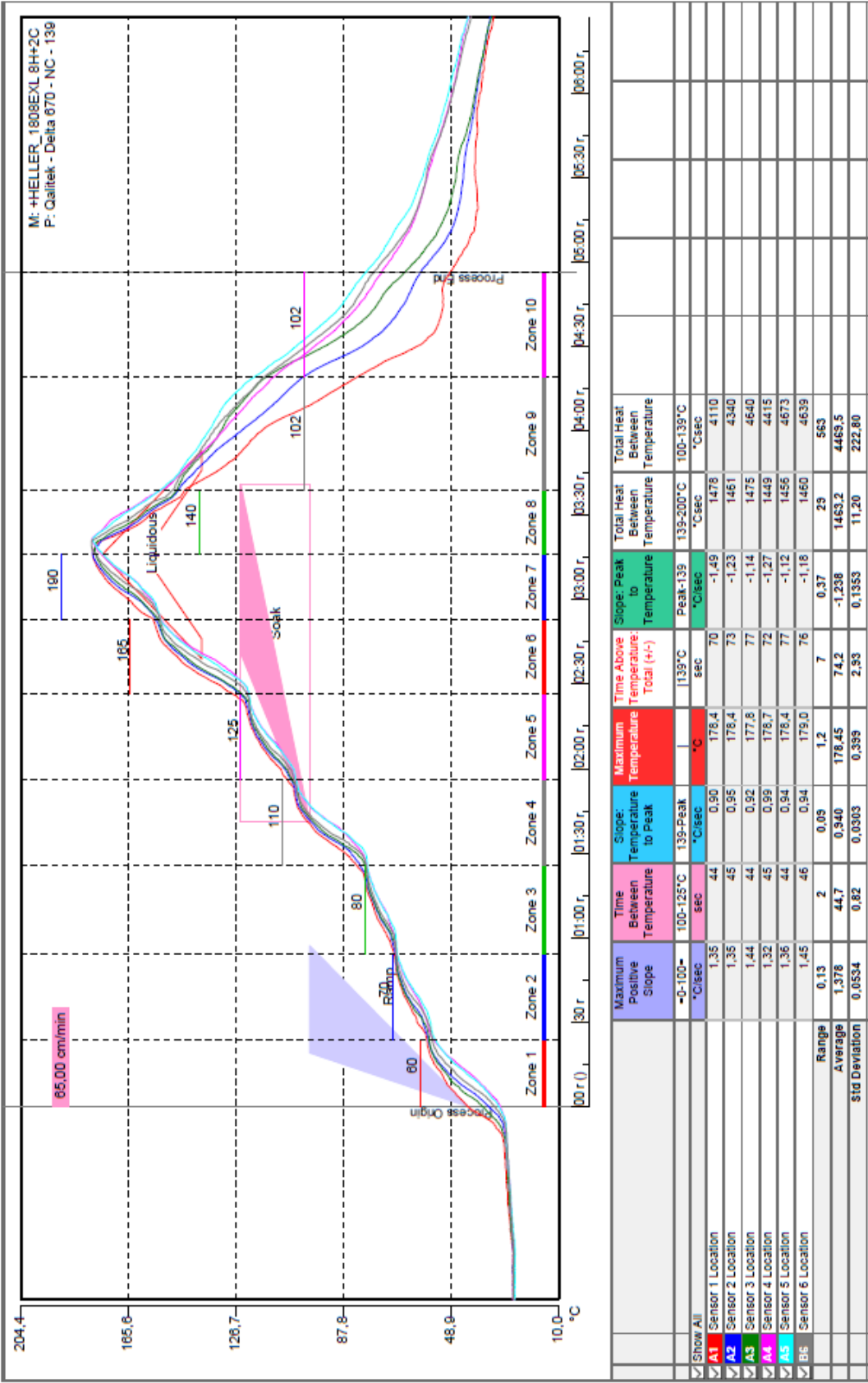
B.1 Teplotní profil P1



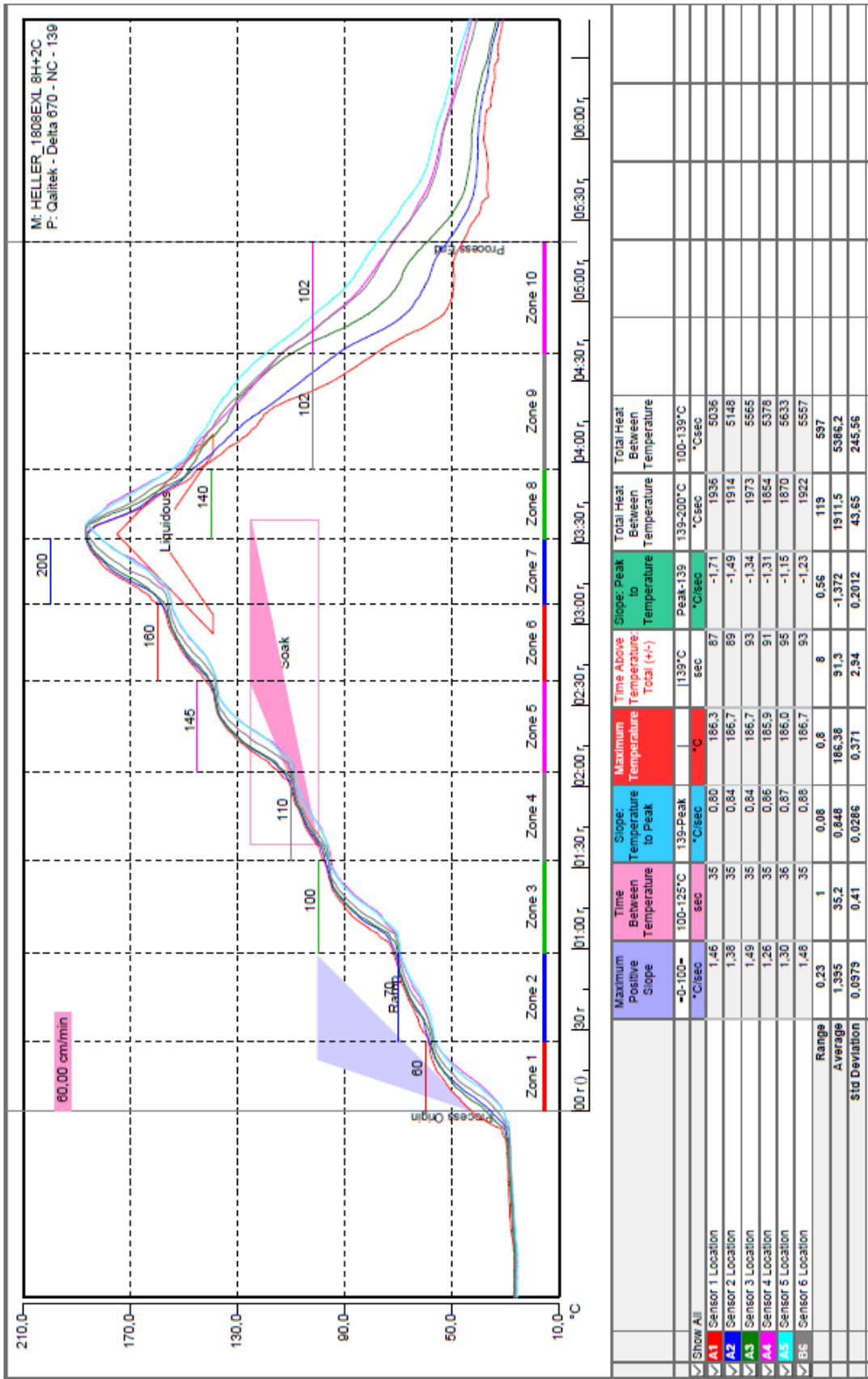
B.2 Teplotní profil P2



B.3 Teplotní profil P3



B.4 Teplotní profil P4



C Technický list BiSn pájecí pasty Delta 670



QUALITEK®

DELTA® 670 Solder Paste No-Clean

DESCRIPTION

670 No-clean solder paste is designed for surface mount and other electronic assembly applications. After reflow, a non-corrosive, non-conductive, highly insulated, transparent residue remains.

BENEFITS

- Belcore compliant
- No cleaning required
- Non-corrosive

APPLICATION

PRINTING / PARTICLE SIZE

≥ 50 mil pitch: Use -200 +325 mesh

≥ 16 mil pitch: Use -325 +500 mesh

≤ 16 mil pitch: Use -400 +635 mesh

ALLOYS

Sn63/Pb37, Sn62/Pb36/Ag2, Sn42/Bi 58, Sn48/In52, etc.
(Meets J-STD-006 Specification)

METAL CONTENT

Stencil Printing: 90%

Screen Printing: 88%

PHYSICAL / CHEMICAL

CHARACTERISTICS

Color and Appearance	Metallic Gray
Water Extract Resistivity (Flux Extract)	>100,00 ohm/cm
Copper Mirror Test	Pass
Silver Chromate (Chloride & Bromide Test)	Pass
Surface Insulation Resistance-Ohms	
J-STD-004	>1.0 x 10 ¹⁰
Electromigration ³	Pass
pH-5% Aqueous Solution (Flux Extract)	4.2 - 4.7
Softening Point	94°C
Viscosity	
Malcom ¹	175 - 205 kcps, 90% metal, (-325+500 mesh)
Brookfield ²	1,000 kcps +/- 10%, 90% metal, (-325+500 mesh)
Tack	
Time	4 - 8 Hours

SHIPPING & STORAGE

Recommended Storage Temperature	35°-50°F
---------------------------------	----------

REFLOW PROFILE

The melting temperature of the solder and the heat resistance of components determine reflow Profile. 670 can be processed in most reflow media, (i.e. IR, Vapor-phase, Forced convection, etc.). Ramp rate of 2.5-3.0°C per second is desirable, since most components are rated for 4.0°C per second.

SHELF LIFE

Unopened Container	35°-65°F	6 Months (from DOM)
	77°F	1 Months (from DOS)

1. Malcom PCU-Series, 10 RPM, 25°C
2. Brookfield RVTID, TF spindle, 5 RPM, 25°C, 0.75" spindle depth
3. Belcore GR-78-CORE

Delta® is a registered trademark of Qualitek International, Inc.

TEL: +44 (0) 151 334 0888 FAX: +44 (0) 151 346 1408 E-mail: qualitek@globalnet.co.uk Internet: www.qualitek.com
9 Apex Court, Bassendale Road, Wirral International Business Park, Bromborough, Wirral, CH62 3RE

QUALITEK

WORLDWIDE BRANCHES: UNITED KINGDOM – MEXICO – CHINA – PHILIPPINES – SINGAPORE-USA

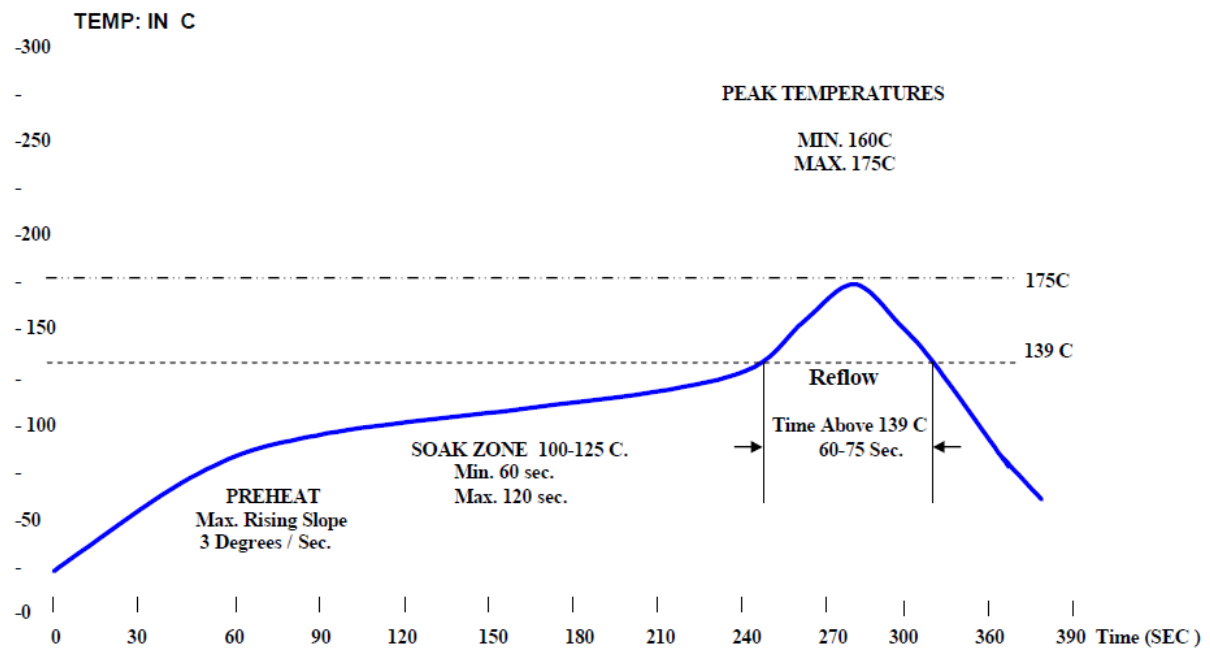
This data is based on information that the manufacturer believed to be reliable and offered in good faith. Qualitek International, Inc. makes no warranties expressed or implied as to its accuracy and assumes no responsibilities and liabilities arising out of its use by others as conditions and methods of use of the products is beyond the control of Qualitek International, Inc. The user must determine the suitability of the product before using it on a commercial basis. The warranties extend only to the conformity of the product to the physical descriptions. In no event will Qualitek International, Inc. be responsible for special, incidental and consequential damages whether the claim is in contract, negligence or otherwise.

Rev. 082099-670

Consult MSDS for health and safety information

Type 670

Sn42/Bi58 Profile



D Měření odporu pájených spojů pro obě sekce; stárnutí 0 h

Teplotní profil P1 - 0 h								
DPS	kód	kód	Ø	σ	kód	kód	Ø	σ
	S 1. 1. 1	S 1. 1. 2			S 1. 2. 1	S 1. 2. 2		
	R [Ω]							
sekce 1	1,531	1,534	1,533	0,002	1,537	1,535	1,536	0,001
sekce 2	1,441	1,454	1,448	0,006	1,459	1,466	1,463	0,003
DPS	kód	kód	Ø	σ	kód	kód	Ø	σ
	A 1. 1. 1	A 1. 1. 2			A 1. 2. 1	A 1. 2. 2		
	R [Ω]							
sekce 1	1,530	1,530	1,530	0,000	1,523	1,545	1,534	0,011
sekce 2	1,446	1,441	1,444	0,002	1,449	1,442	1,446	0,004
Teplotní profil P2 - 0 h								
DPS	kód	kód	Ø	σ	kód	kód	Ø	σ
	S 2. 1. 1	S 2. 1. 2			S 2. 2. 1	S 2. 2. 2		
	R [Ω]							
sekce 1	1,530	1,513	1,522	0,009	1,530	1,554	1,542	0,012
sekce 2	1,443	1,418	1,431	0,013	1,457	1,465	1,461	0,004
DPS	kód	kód	Ø	σ	kód	kód	Ø	σ
	A 2. 1. 1	A 2. 1. 2			A 2. 2. 1	A 2. 2. 2		
	R [Ω]							
sekce 1	1,532	1,525	1,529	0,004	1,518	1,516	1,517	0,001
sekce 2	1,439	1,461	1,450	0,011	1,432	1,440	1,436	0,004
Teplotní profil P3 - 0 h								
DPS	kód	kód	Ø	σ	kód	kód	Ø	σ
	S 3. 1. 1	S 3. 1. 2			S 3. 2. 1	S 3. 2. 2		
	R [Ω]							
sekce 1	1,513	1,522	1,518	0,005	1,544	1,529	1,537	0,008
sekce 2	1,427	1,452	1,440	0,013	1,466	1,457	1,462	0,004
DPS	kód	kód	Ø	σ	kód	kód	Ø	σ
	A 3. 1. 1	A 3. 1. 2			A 3. 2. 1	A 3. 2. 2		
	R [Ω]							
sekce 1	1,530	1,524	1,527	0,003	1,540	1,536	1,538	0,002
sekce 2	1,456	1,446	1,451	0,005	1,438	1,464	1,451	0,013
Teplotní profil P4 - 0 h								
DPS	kód	kód	Ø	σ	kód	kód	Ø	σ
	S 4. 1. 1	S 4. 1. 2			S 4. 2. 1	S 4. 2. 2		
	R [Ω]							
sekce 1	1,544	1,519	1,532	0,013	1,547	1,530	1,539	0,008
sekce 2	1,458	1,445	1,452	0,006	1,467	1,452	1,460	0,008
DPS	kód	kód	Ø	σ	kód	kód	Ø	σ
	A 4. 1. 1	A 4. 1. 2			A 4. 2. 1	A 4. 2. 2		
	R [Ω]							
sekce 1	1,535	1,523	1,529	0,006	1,544	1,552	1,548	0,004
sekce 2	1,446	1,450	1,448	0,002	1,469	1,454	1,462	0,008